LUIS RICARDO FERNANDES DA COSTA
(ORGANIZADOR)
Geociências:
Entraves, lacunas profissionais e pesquisa
2
Atena
Editora
Ano 2023

LUIS RICARDO FERNANDES DA COSTA
(ORGANIZADOR)

Geociências:

Entraves, lacunas profissionais e pesquisa

2

Atena
Editora
Ano 2023

CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA E ENGENHARIAS

Geociências: entraves, lacunas profissionais e pesquisa 2

Diagramação:	Camila Alves de Cremo
Correção:	Maiara Ferreira
Indexação:	Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão:	Os autores
Organizador:	Luis Ricardo Fernandes da Costa

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

G342 Geociências: entraves, lacunas profissionais e pesquisa 2 / Organizador Luis Ricardo Fernandes da Costa. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2023.

Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia
ISBN 978-65-258-1426-1
DOI: https://doi.org/10.22533/at.ed.261231206

1. Geociências. I. Costa, Luis Ricardo Fernandes da (Organizador). II. Título.

CDD 550

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná – Brasil
Telefone: +55 (42) 3323-5493
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.

DECLARAÇÃO DA EDITORA

APRESENTAÇÃO

É com grande satisfação que apresentamos a obra "Geociências: Entraves, lacunas profissionais e pesquisa 2", que apresenta uma série de cinco artigos com abordagens que abordam a análise da mineração, assim como a estabilidade em taludes, importantes componentes para o planejamento ambiental e diferentes áreas.

Assim, a obra dá continuidade a importantes discussões na temática ambiental, além de cumprir papel importante na disseminação de pesquisas que servirão de base para trabalhos na área, principalmente para estudantes de Graduação e Pós-graduação.

Dessa forma, convidamos a comunidade em geral para conferir esse mais novo volume, com possibilidades e propostas para a aplicação e disseminação das pesquisas em diferentes realidades e escalas de análise.

Luis Ricardo Fernandes da Costa

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE ESCAVAÇÕES SUBTERRÂNEAS EM ROCHA - ESTUDO DE CASO DE MINERAÇÃO

Data de submissão: 08/05/2023 *Data de aceite: 02/06/2023*

Diogo Peixoto Cordova
Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA
Caçapava do Sul – RS
http://lattes.cnpq.br/2354744565105719

Andre Cezar Zingano
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS
Porto Alegre – RS
http://lattes.cnpq.br/9534063417527053

RESUMO: Processos de instabilidade em escavações subterrâneas, em maciços rochosos, produzem diversos riscos de segurança para a operação. Principalmente quanto a danos físicos e ambientais, além do aumento de custos. Buscando a diminuição dessas instabilidades, novas ferramentas como a modelagem numérica de problemas, tem sido amplamente utilizada de forma a otimizar os projetos e as definições quanto ao suporte a ser utilizados para estabilização das escavações. O estado tensional também precisa ser estudado e compreendido em cada cenário, pois a elevada concentração de tensões, assim como a ausência (relaxamento) de tensões, também produz situações de instabilidades. O contato abrupto entre maciços rochosos de diferentes propriedades elásticas e de resistência, também exigem um cuidado extra, no momento do dimensionamento do suporte das escavações. Um estudo de caso abordando o problema de instabilidade em uma mina subterrânea é mostrado. No exemplo foram criados modelos numéricos a partir da variação dos parâmetros de entrada, até que o resultado correspondesse a realidade existente. A partir destes modelos calibrados com a realidade, foi então possível propor otimizações e melhorias no projeto das galerias subterrâneas. Essas pequenas mudanças mostraram-se efetivas na diminuição da instabilidade e diluição do minério, durante a análise dos modelos numéricos.
PALAVRAS-CHAVE: modelagem numérica, otimização, estado tensional, segurança da operação.

STABILITY ANALYSIS OF UNDERGROUND EXCAVATIONS IN ROCK – MINING CASE STUDY

ABSTRACT: Instability processes in underground rock excavations produce several safety risks for the operation, especially in terms of physical and

environmental damage in addition to increased costs. Seeking to reduce these instabilities, new tools as numerical modeling, have been widely used to optimize projects and definitions regarding the roof support of excavations. The tensional state of the scenario also needs to be understood, as both high stress concentration and low stress (relaxation) also produce instability. The abrupt contact between rock masses with different elastic and strength properties also requires extra care when choosing roof support. A case study is shown addressing the instability problem in an underground mine. In the example, numerical models were created, from the variation of the input parameters until the result corresponded to reality. From these calibrated models, it was possible to propose optimizations and improvements in the design of underground galleries. These small geometry changes proved effective in reducing the instability and dilution of the ore during the analysis of the numerical models.
KEYWORDS: numerical modelling, optimization, stress state, operation safety.

1 I INTRODUÇÃO

Na mineração subterrânea as instabilidades ocorrem de forma mais ou menos controlada, uma vez que cada método de lavra possui uma diluição esperada no momento da produção do minério. O impacto econômico do aumento da diluição está distribuído no aumento de diversos custos da operação, ocasionando um desperdício na capacidade total de processamento do bem mineral. Dessa forma, manter uma baixa diluição é um fator muito importante tanto para o sucesso econômico quanto para a segurança da operação.

Como medida primordial, se faz necessário quantificar as diluições existentes em cada estudo de caso. Os métodos empíricos para o dimensionamento de escavações ainda são amplamente utilizados. Porém, o crescente uso de modelos numéricos permite que estes sejam capazes de representar a realidade do problema, em termos de resposta do maciço rochoso quanto a zonas de deformação, ruptura e consequentemente de instabilidade e de diluição. Isto por si só justifica o uso desses modelos numéricos como ferramenta de otimização para os projetos, comprovando que pequenas alterações de desenho podem colaborar com a diminuição de instabilidades e da diluição não planejada, no método de lavra considerado.

1.1 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo geral estudar a instabilidade de escavações subterrâneas, com auxílio de modelagem numérica. Como objetivos específicos destacam-se:

- Entender os mecanismos de instabilidade, além dos métodos disponíveis para cálculo da diluição, utilizando dados provenientes do escaneamento das câmaras;
- Revisar os parâmetros utilizados para o maciço rochoso e as tensões assumidas para criação do modelo numérico;

- Criar modelos numéricos que representem o cenário real dos problemas analisados;
- Verificar, por meio dos modelos numéricos calibrados, os efeitos de determinadas modificações no desenho de lavra com objetivo de diminuir a diluição;

2 | ESTADO DA ARTE

2.1 Caracterização geomecânica

Os sistemas de classificação geomecânica dos maciços rochosos são sistemas empíricos. Com a utilização desses sistemas pode-se obter parâmetros geotécnicos específicos ou até mesmo dimensionar escavações subterrâneas, em função das características de autossuporte dos maciços.

As classificações são incorporadas no estudo geomecânico como uma importante ferramenta para a caracterização do maciço rochoso e para a correlação de dados de entrada para o dimensionamento e a verificação do comportamento da escavação subterrânea (usando métodos numéricos ou analíticos).

Brady e Brown (2005) referem que os sistemas populares de classificação usados atualmente incluindo o GSI, o Sistema Q e o RMR, são baseados na determinação de pesos para o maciço rochoso dentro de uma faixa de valores, e que podem ser usados, também, para a estimativa da necessidade de suporte. Escavações de mesma ordem são agrupadas em regiões onde o processo de escavação e a necessidade de suporte são essencialmente parecidas.

2.2 Tensões naturais

As tensões naturais, também chamadas de tensões *in situ*, primitivas ou tensões virgens, são as tensões que existem na rocha sem haver nenhum distúrbio. No geral, as tensões *in situ* atuantes em um determinado maciço rochoso são produto de eventos cumulativos na história geológica. Um maciço rochoso pode ter sofrido vários ciclos de processos geológicos físico-químicos, térmicos e mecânicos sendo que todos esses fatores contribuíram para as tensões *in situ*, alguns influenciando mais do que outros (AMADEI; STEPHANSSON, 1997). As tensões *in situ* controlam a distribuição e magnitude das tensões ao redor das escavações subterrâneas, como em túneis, minas, poços e cavernas (HOEK; BROWN, 1980).

Em geral, os problemas de estabilidade relacionados as tensões, aumentam com a profundidade, mas também podem ser encontrados em escavações de baixa profundidade (0 a 200 m) devido as altas tensões *in situ* horizontais. A distribuição e magnitude das tensões *in situ* afetam a geometria, forma, dimensionamento, sequência de escavação e orientação das escavações subterrâneas (AMADEI; STEPHANSSON, 1997).

Em geral, estimar as tensões *in situ* requerem uma caracterização detalhada da geologia do local e um julgamento adequado. Uma prática comum é fazer duas considerações quando se está estimando as tensões em uma determinada profundidade, z, em um maciço rochoso. A primeira consideração é a de que o estado de tensões pode ser descrito por duas componentes: uma vertical (σ_v) devido ao peso da rocha da cobertura naquela profundidade, calculada pela equação 1, (onde y é o peso especifico médio da rocha em MN/m) e uma componente horizontal (σ_h) calculada pela equação 2. A outra consideração é a de que ambas tensões σ_v e σ_h são tensões principais (AMADEI; STEPHANSSON, 1997).

$$\sigma_v = \gamma . z \quad (1)$$

$$\sigma_h = k . \sigma_v \quad (2)$$

2.3 Modelos numéricos

A principal aplicação dos modelos numéricos em projetos de escavação, é fornecer uma análise da estimativa de alterações na tensão, deformação e deslocamentos induzidos pelo processo de escavação. Tais informações são um guia para a avaliação da estabilidade, segurança e economia de projetos e planejamento de escavações subterrâneas ou a céu aberto. Pariseau (1993), Brady e Brown (2005) e Jing e Hudson (2002) apresentam os princípios básicos de aplicações de elementos finitos em análise de tensões e deformações em aberturas subterrâneas. Em geral a metodologia adotada para modelagem numérica pode ser resumida nos seguintes tópicos:

a) Definir o objetivo da análise: O modelador precisa ter uma ideia clara do que esperar como resultado de saída da análise;

b) Preparação do modelo: O modelo precisa ser uma representação simples da realidade ao mesmo tempo que deve garantir que todos os detalhes essenciais estejam presentes;

c) Verificação do programa: Para gerar confiança nos resultados é preciso primeiro realizar verificações comparando modelos simples com soluções já existentes;

d) Dados de entrada e condições de contorno: Os parâmetros de entradas devem ser inseridos, como propriedades dos materiais, geometrias e as condições de borda do problema. A utilização de estágios (*stages*) permite verificar de forma rápida a redistribuição de tensões após cada umas das escavações, segundo sua sequência de extração;

e) Definição da malha: Uma malha adequada deve ser definida e discretizada com um número de elementos capaz de representar todos os detalhes do problema;

f) Executar e calibrar o modelo: Resultados são comparados com medidas de campo e o modelo deve ser recalibrado para corresponder essas medidas;

g) Interpretação dos resultados: Uma interpretação correta dos resultados depende

da experiência e conhecimento do modelador.

Em resumo as principais etapas de criação dos modelos numéricos são descritas na Figura 1 abaixo.

Figura 1 - Sequência de criação do modelo numérico. Fonte: Autoria própria

2.4 Tensões e instabilidades

Durante a escavação das galerias de acesso existem pontos cruciais onde ocorrem grandes alterações nas tensões induzidas. Um desses pontos é justamente no contato entre a galeria inferior de acesso ao *stope* (*undercut*) com a parede do *hangingwall*. Neste ponto há uma interrupção da continuidade das tensões no *hangingwall*, produzindo uma zona de relaxamento de tensões onde as tensões são próximas a zero e tangenciais a parede da câmara. Wang (2004) examinou esse efeito causado pelo *undercut* verificando sua influência na estabilidade das paredes (Figura 2).
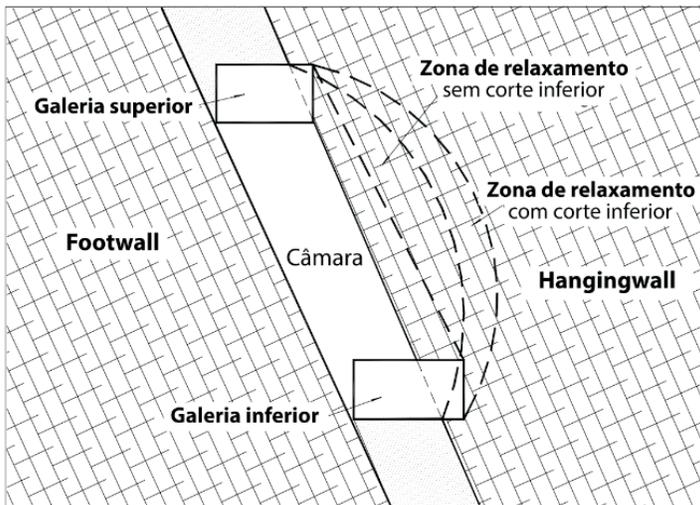
Figura 2. Esquema ilustrativo da influência da zona de relaxamento em uma câmara aberta

A diluição no *hangingwall* é resultado do relaxamento de tensões do maciço rochoso. Ela é definida como uma redução no estado de tensões paralelo à parede da escavação. Em outras palavras, a diluição ocorre quando a tensão principal menor (σ_3) é igual ou menor a zero (Martin et al, 1999).

Clark e Pakalnis (1997) desenvolveram a classificação ELOS (equação 3) com o

objetivo de obter valores linearizados da diluição, permitindo uma comparação direta entre diferentes situações.

$$ELOS = \frac{V^{S}_{OB}}{A_S} * 100 \qquad (3)$$

Onde V^{s}_{OB} é o volume do *overbreak*, e A_S é a área da superfície exposta do *hangingwall*. A Tabela 1 a seguir demonstra os intervalos de valor ELOS e o nível de instabilidade esperada.

ELOS	Observação
< 0.5m	Instabilidade causada somente pelo desmonte
0.5m – 1m	Instabilidade leve
1m – 2m	Instabilidade moderada
> 2m	Instabilidade excessiva

Tabela 1. Intervalos de valores ELOS.

3 | ESTUDO DE CASO

O estudo de caso a seguir apresentado encontra-se publicado com maior nível de detalhe, no trabalho de Cordova (2016). Este estudo de caso de mineração compreende uma mina localizada na cidade de Minas de Corrales, no norte do Uruguai, departamento de Rivera, cerca de 70km ao sul da fronteira internacional com o Brasil e 450km ao norte da capital do Uruguai, Montevidéu. Alguns depósitos principais estão localizados na região de Minas de Corrales. Inicialmente um desses depósitos foi lavrado a céu aberto, sendo posteriormente lavrado de forma subterrânea, objeto de estudo deste trabalho.

A Ilha forma uma janela de rochas pré-cambrianas que se estendem ao longo de cerca de 110 km por 30 km de largura máxima. (Figura 3). Ela é caracterizada por um embasamento integrado principalmente por rochas metamórficas, que variam entre fácies xistos verdes até granulito, com intrusões graníticas associadas.

O método de lavra Câmaras Transversais foi utilizado para extrair a zona mineralizada de maior dimensão. O método de Câmaras Transversais é uma variação transversal do método *Sublevel Stope*, que consiste em extrair o minério formando grandes câmaras abertas separadas por sub-níveis de acesso ao longo da direção de maior continuidade do corpo mineralizado.
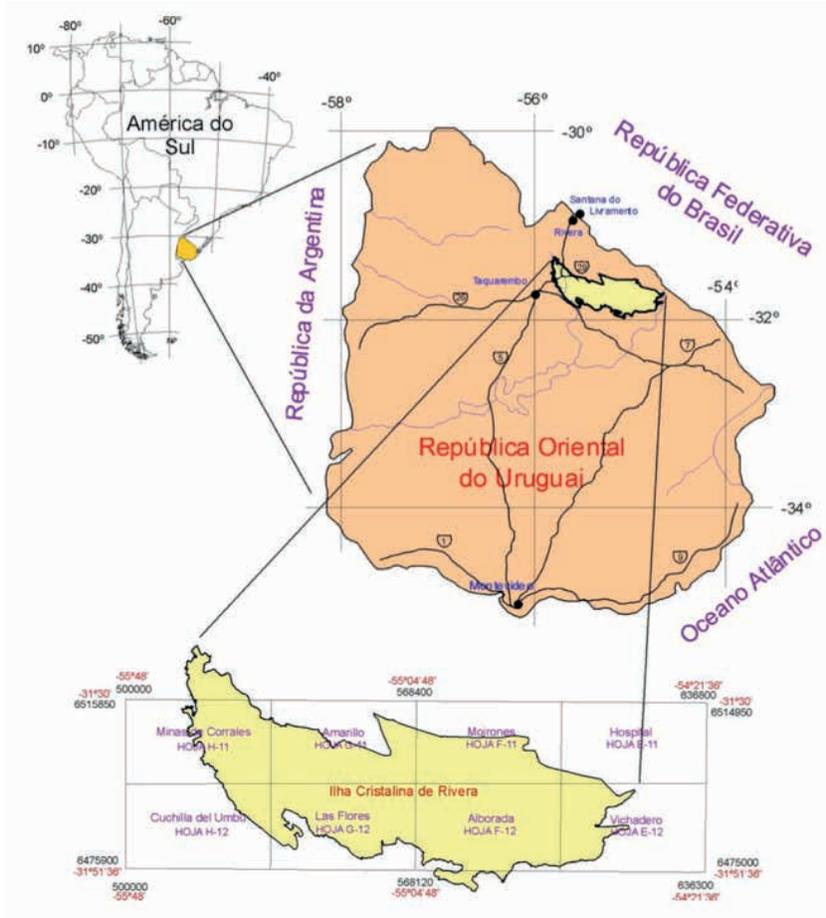
Figura 3 - Mapa de localização da área. Fonte: Quadros, 2000.

3.1 Propriedades geomecânicas

As propriedades geomecânicas das distintas unidades litológicas que formam o maciço rochoso, foram estimadas principalmente com base nas informações provenientes dos ensaios de laboratório e demais dados relevantes.

As unidades do maciço rochoso foram caracterizadas seguindo o critério generalizado de Hoek-Brown (HOEK; CARRANZA-TORRES; CORKUM, 2002), o qual define a resistência do maciço rochoso como uma envoltória de ruptura não linear, conforme demonstra a equação 4.

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci}\left(m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s\right)^a \tag{4}$$

Onde:

- σ'_1 e σ'_3, as tensões efetivas principais maior e menor;

- m_i, parâmetro associado a inclinação da envolvente de ruptura da rocha;
- σ_{ci}, resistência a compressão uniaxial da rocha intacta;
- *GSI*, índice de resistência geológica;
- *D*, é um fator dependente do grau de perturbação do maciço rochoso por efeito do dano produzido pelo desmonte e o relaxamento das tensões. Para as estimativas apresentadas foi considerado um valor igual a 0 o que corresponde a maciços rochosos *in situ* não alterados ou a túneis com desmonte controlado e dano mínimo no maciço rochoso.

No caso dos valores de m_i, estes foram estimados a partir dos resultados dos ensaios triaxiais, uniaxiais e de tração. Foi utilizado o software Roclab para extrapolar a curva e obter, de maneira inversa, os valores de m_i e σ_{ci} em base aos esforços principais na rocha. A Tabela 2 demonstra as propriedades geomecânicas consideradas para do maciço rochoso.

Domínio	**mb**	**s**	**a**	σ_{cm} (MPa)	σ_{tm} **(MPa)**	**E (GPa)**	**V**
Estéril (HW)	1,83	0,007	0,5	3,05	0,14	21,9	0,23
Minério	4,17	0,036	0,5	19,95	0,91	50,9	0,20
Estéril (FW)	2,48	0,020	0,5	17,17	1,00	44,1	0,21

Tabela 2. Propriedades geomecânicas do maciço rochoso

3.2 Quantificação da instabilidade

Por meio da metodologia de utilização dos dados de escaneamento realizados nas 32 câmaras produzidas, foi possível a criação de um banco de dados contendo o desempenho de cada uma das câmaras. Para isso foi utilizado a metodologia de cálculo do fator ELOS, além do cálculo da diluição. A média da diluição foi de 14% e a média do fator ELOS foi de 2,40 m. Em resumo das 32 câmaras produzidas e examinadas:

- 12 tiveram alguma influência estrutural de câmaras adjacentes;
- 4 tiveram galerias de desenvolvimento realizadas dentro da zona do *hangingwall* que contribuíram para a diluição;
- 16 eram câmaras do tipo secundária;

4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

A densidade de diluição (DD) dos modelos numéricos produzidos, a partir das câmaras primárias selecionadas, foram plotadas com o valor ELOS obtido a partir dos dados de escaneamento das câmaras. Em outras palavras, a diluição real foi plotada contra o valor projetado (DD) do resultado dos modelos numéricos (Figura 4).
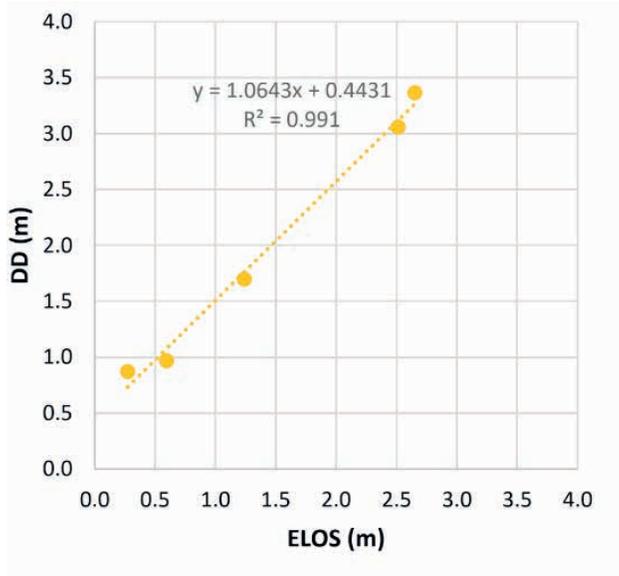
Figura 4. Gráfico dos valores DD plotados com o valor ELOS.

Percebe-se uma boa correlação entre os dados, porém se verifica uma tendência em superestimar a diluição. Também foram realizados modelos numéricos com diferentes valores de k_1 e k_2 de maneira a verificar sua influência no resultado do modelo. A Figura 5 abaixo mostra o gráfico com diferentes valores de k_1 e k_2 testados.
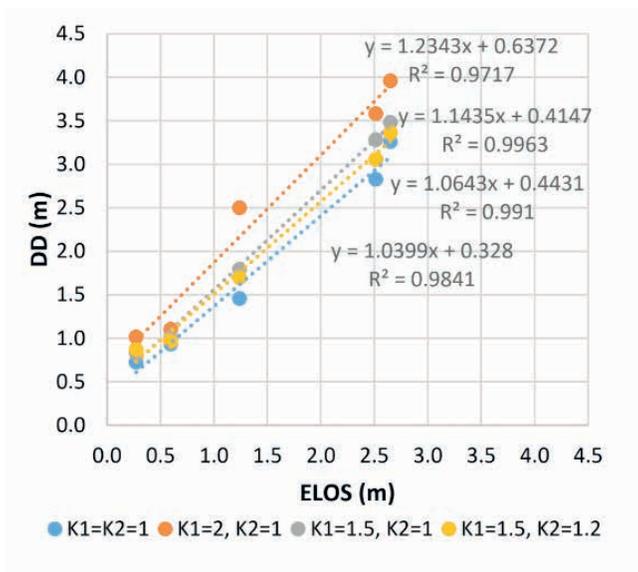
Figura 5. Gráfico dos valores DD plotados com o valor ELOS para diferentes fatores k1 e k2.

Os modelos numéricos para a condição isotrópica de k_1 igual a k_2 e iguais a 1, tiveram melhor ajuste em comparação com os outros valores de k_1 e k_2. Porém uma condição isotrópica de tensões não reflete a realidade, portanto se manteve a consideração inicial da curva de k_1 igual a 1.5 e k_2 = 1.2 que também possui um bom ajuste entre os dados.

Os outros modelos simulados foram para verificar a influência da sobre escavação da galeria de *undercut* e *overcut,* no relaxamento das tensões do *hangingwall* (Figura 6).
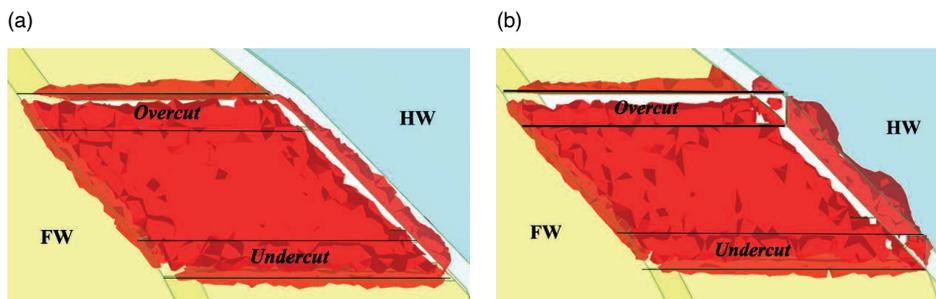
Figura 6. A isosuperfície em vermelho representa a zona de σ_3<0, Para um modelo numérico de uma câmara teórica: (a) sem sobre-escavação das galerias no contato com o *hangingwall*; (b) com sobre-escavação das galerias no contato com o *hangingwall*.

A densidade de diluição (DD) calculada para o caso sem sobre escavação **é** de 1,28m, já para o caso com sobre escavação da galeria no *hangingwall* o valor **é** 1,64m, ou seja, um aumento em 28% na diluição.

5 I CONCLUSÕES

Os dimensionamentos para a escavação de câmaras subterrâneas são geralmente realizados a partir do método empírico de estabilidade. Entretanto esse método não considera a redistribuição de tensões ou zona de relaxamento que ocorre ao redor das escavações quando realizadas. Além disso, os métodos também não consideram o efeito da orientação da escavação com as tensões naturais atuantes.

Por outro lado, o uso de modelagem numérica mostra-se como uma grande ferramenta para análise da instabilidade, e consequentemente da diluição. Diferentes desenhos e geometrias podem ser validadas, diminuindo assim a diluição produzida por relaxamento de tensões.

Da mesma forma, o dimensionamento de suporte com tirantes-cabo também pode ser realizado por meio da modelagem numérica, pois a função dos cabos é manter suspenso o volume de material rochoso que está dentro da considerada zona de relaxamento de tensões. O tamanho dos cabos pode ser definido de maneira que estes estejam fora da zona de relaxamento. Já a densidade de cabos pode ser calculada através do peso dessa

zona dividido pela capacidade de carga de cada tirante-cabo.

REFERÊNCIAS

AMADEI, B.; STEPHANSSON, O. **Rock stress and its measurement.** London: Chapman & Hall, 1997. 490 p.

BRADY, B. H. G.; BROWN, E.T. **Rock Mechanics for Underground Mining**. 3. ed. New York: Springer Science + Business Media Inc, 2005. 647 p.

CLARK, L.; PAKALNIS, R. An empirical design approach for estimating unplanned dilution from open stope hangingwalls and footwalls. Em: 99th CIM-AGM, Vancouver. **Proceedings...** Calgary: CIM, 1997.

CORDOVA, D. P. **Análise da diluição no método câmaras transversais utilizando modelagem numérica - estudo de caso mina Arenal Deeps**. 2016. 180 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Tecnologia Mineral, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

HOEK, E.; BROWN, E. T. **Underground Excavations in Rock**. Londres: Institution of Mining and Metallurgy, 1980, 527 p.

HOEK, E.; CARRANZA-TORRES, C.; CORKUM, B. Hoek-Brown Failure Criterion – 2002 Edition. In: 5th north american rock mechanics symposium and 17th tunneling association of canada conference, Toronto. **Proceedings...** Toronto, 2002. p. 267 - 271.

JING, L.; HUDSON, J.A. Numerical methods in rock mechanics. **International Journal Of Rock Mechanics And Mining Sciences**, v. 39, n. 4, p.409-427, jun. 2002.

MARTIN, C. D. et al. Stress path and instability around mine openings. In: ISRM CONGRESS ON ROCK MECHANICS, 9th, Paris. **Proceedings...** Rotterdam: Balkema, 1999. p. 311 - 315.

PARISEAU, W. G. (Ed.). Finite Element Applications in Mining Engineering. em: HUDSON, John A. **Comprehensive Rock Engineering.** Londres: Pergamon Press, 1993. Vol. 1, Cap. 20. p. 491-522.

QUADROS, Telmo Fernando Perez. **Integração de Dados em ambiente SIG para Mapeamento de Favorabilidade Mineral de Ouro na Ilha Cristalina de Rivera (Uruguai).** 2000. 285 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Minas, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, UFRGS, Porto Alegre.

WANG, Jucheng. **Influence of stress, undercutting, blasting and time on open stope stability and dilution.** 2004. 279 f. Tese (Doutorado) - Department Of Civil And Geological Engineering, University Of Saskatchewan, Saskatoon.

CAPÍTULO 2

ANÁLISE DE ESTABILIDADE EM DEPÓSITOS CONTROLADOS DE ESTÉRIL DE MINERAÇÃO - ESTUDO DE CASO

Data de submissão: 02/05/2023　　*Data de aceite: 02/06/2023*

Gislene de Sá Souza
Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA
Caçapava do Sul – RS
http://lattes.cnpq.br/3730069690845297

Diogo Peixoto Cordova
Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA
Caçapava do Sul – RS
http://lattes.cnpq.br/2354744565105719

RESUMO: A estabilidade de um depósito controlado de estéril (DCE) deve ser observada, visto que uma deposição acelerada poderá ocasionar elevadas tensões de cisalhamento, aumento de poro pressão e instabilidade. Um sistema de classificação é uma metodologia aplicada para estimar o potencial de ruptura que uma pilha poderá ter, permitindo avaliar seu comportamento e analisar fatores que afetam sua estabilidade. Essas informações permitem antever o comportamento interno da DCE, identificando problemas condicionantes, realizando classificações prévias dos possíveis locais para sua construção, além de estabelecer investigação, projeto, construção e monitoramento de acordo com cada classe encontrada. A proposta deste estudo de caso foi examinar a estabilidade de três depósitos de estéril de uma mineradora localizada na cidade de Caçapava do Sul/RS, identificando, analisando e mitigando riscos geotécnicos das pilhas, além de identificar o fator de segurança (FS). A avaliação foi realizada de forma semiquantitativa, onde o resultado estabelece uma classe de acordo com o potencial de instabilidade. Para a verificação do potencial de estabilidade, foi empregado o método de equilíbrio limite definindo o FS das DCEs. O resultado demonstrou estabilidade dos taludes, porém em alguns pontos se sugere um monitoramento e melhora da drenagem.

PALAVRAS-CHAVE: pilhas de estéril, sistema de classificação, fator de segurança, riscos geotécnicos.

STABILITY ANALYSIS OF MINING WASTE DUMP – CASE STUDY

ABSTRACT: The amount of material deposited in a controlled waste deposits in a short time must be observed, since an imminent accumulation can cause high shear stresses, increase in pore pressure and instability. A classification system is a

methodology applied to estimate the failure potential that a pile may have, allowing to evaluate its behavior and analyze factors that affect its physical stability. This information makes it possible to foresee the internal behavior of the pile, identifying conditioning problems, carrying out previous classifications of possible locations for its construction, in addition to establishing investigation, design, construction and monitoring according to each class. The purpose of this case study was to examine three waste piles of a mining company located in the city of Caçapava do Sul/RS, identifying, analyzing, and mitigating geotechnical risks of the piles, in addition to identifying safety factors. The evaluation was carried out in a semi-quantitative way, where the result establishes a class according to the instability potential. To verify the stability, the limit equilibrium method was used, defining the safety factor of the piles. The results showed a stable scenario, even though, some points need geotechnical monitoring.
KEYWORDS: waste piles, classification system, safety factor, geotechnical risks.

1 I INTRODUÇÃO

A norma ABNT NBR 13029:2017, determina imposições mínimas para a elaboração e apresentação de projeto de pilha para disposição de estéril, atendendo às condições de segurança, operacionalidade, economia e desativação. Além destes, sua construção deve seguir as normas ambientais e os critérios econômicos, estruturais, sociais, de segurança e risco.

O planejamento das DCEs (*Depósitos Controlados de Estéril*) termo utilizado atualmente, é imprescindível para execução de uma mina, sendo uma das maiores estruturas geotécnicas na mineração. É necessário realizar um projeto que reduza os custos à mineradora, porém concomitante atenda às normas vigentes de segurança e ambiental (VICTORINO, 2016). A disposição de uma quantidade considerável de material sobre o local das DCEs, em um curto espaço de tempo, proporciona elevadas tensões de cisalhamento, propiciando um aumento repentino na poro pressão, e como resultado a instabilidade de fundação da pilha (NUNES, 2014).

A estabilidade das pilhas deve ser cuidadosamente avaliada e monitorada durante a fase operacional da lavra (ROBERTSON *et. al.*, 1985). A realização de estudos de acompanhamento na construção e o monitoramento da pilha devem ser executados periodicamente, observando sua estabilidade, deste modo, evita-se os problemas técnicos que poderão surgir. Um sistema de classificação oferece a identificação mínima que uma DCE deve ter, como seu tipo e sua configuração, a partir do seu produto, estrutura ou processo. Essas informações permitiriam antever o comportamento interno da pilha e identificar problemas condicionantes (ARAGÃO & FILHO, 2011).

1.1 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo geral estudar a estabilidade dos taludes das pilhas de disposição de estéril, pertencentes a uma mineradora. Como objetivos específicos destacam-se:

- identificar, analisar e sugerir a mitigação de riscos geotécnicos nas DCEs;
- avaliar seu estado de conservação;
- analisar a estabilidade dos taludes onde é disposto o estéril, identificando os fatores de segurança;
- propor melhorias de manutenção e conservação dos taludes através de monitoramento geotécnico.

1.2 Localização do estudo de caso

A área do estudo de caso se dá em uma mina de calcário dolomítico no município de Caçapava do Sul, localizada a dez quilômetros do centro urbano e que tem como principal via de acesso a BR-392, conforme a Figura 1. A cidade pertence a mesorregião central do Rio Grande do Sul, cerca de 260 km a oeste da capital Porto Alegre. A atividade da mineradora consiste na produção de calcário, cal e argamassa, utilizados na construção civil e agronegócio.
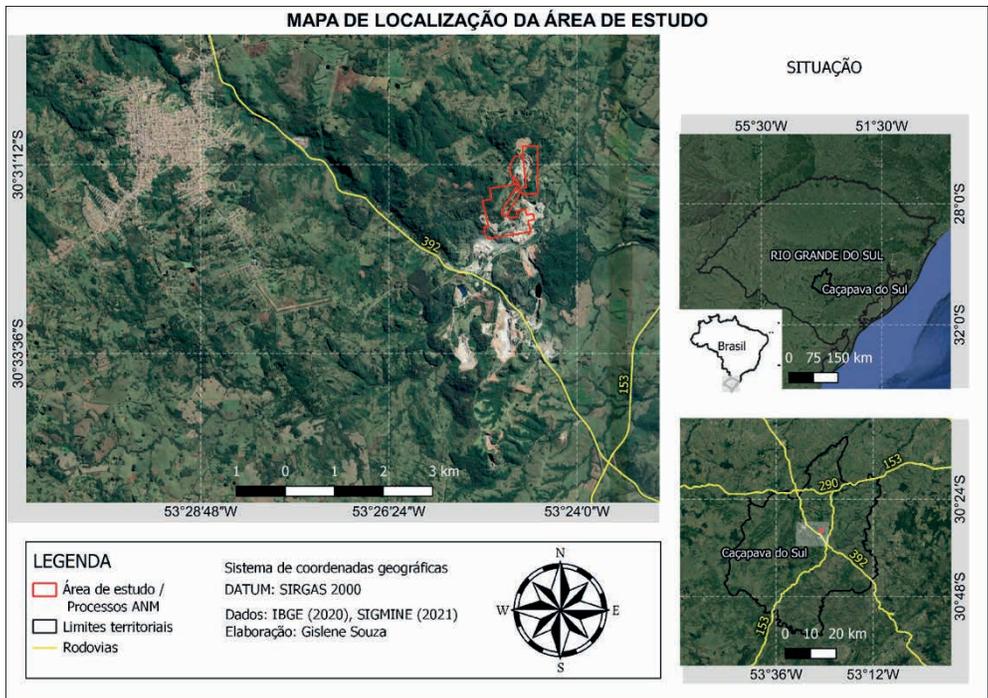
Figura 1 – Mapa de localização da área. Fonte: Elaborado pela autora.

2 I ESTADO DA ARTE

2.1 Métodos construtivos das DCES

A formação de uma DCE deve constar no planejamento da mina, reunindo informações relevantes sobre os possíveis locais de implementação, características geológicas, ambientais, topográficas, hidrológicas, a quantidade de material que será depositado e o método de construção que será realizado.

De acordo com Forgearini *et al.* (2015), devido a DCE ser constituída por inúmeros tipos de materiais é considerável o cuidado com as características como coesão, ângulo de atrito, peso específico e ângulo natural de estabilidade dos materiais que abrangem todo o estéril. Para a construção da pilha, deve-se começar pela parte inferior com material relativamente seco, sendo empilhado para formar plataformas, deste modo o espalhamento e adensamento propicia um pequeno ângulo global de talude (FERREIRA, 2016). A disposição do estéril deve ser feita ao longo do comprimento da crista, fazendo desta a parte a mais extensa possível, reduzindo a taxa de avanço de elevação do aterro, favorecendo, portanto, a estabilidade (PETRONILHO, 2010).

No método construtivo, a disposição é feita por meio de camadas espessas, formando sucessivas plataformas de lançamento espaçadas com 10 m ou mais de intervalos, onde na operação é planejada para se aproveitar o máximo das condições geomorfológicas do terreno. A estabilidade pode aumentar, monitorando a largura, o comprimento e o espaçamento vertical das plataformas (ARAGÃO, 2008).

2.1.1 Método ascendente

A construção do método ascendente pode ser executada por camadas ou por bancadas. Elaborado por camadas, as pilhas serão construídas em horizontes e cada camada deverá ter a espessura de até 1,5 m. Na construção por bancada, a pilha desenvolve na altura de um banco e poderá ter a altura de 10 a 20 m (ARAGÃO, 2008). O empilhamento é realizado de jusante para montante, onde o estéril é direcionado às cabeceiras da bacia de drenagem a partir de um enrocamento de pé, de acordo com a Figura 2. O transporte e lançamento do material na plataforma de trabalho formam pilhas com altura de 2 a 3 m e o espalhamento do estéril constituindo camas com espessuras de 1 a 15,5 m realizado pelo trator de esteira. À medida que é realizado o tráfego de veículos, esse material é compactado (VICTORINO, 2016).

Neste método cada alteamento sustenta o precedente, sendo considerado o método mais vantajoso e preferível, pois o comportamento das pilhas pode ser documentado e compreendido (ARAGÃO, 2008). Os pontos favoráveis desse método é que qualquer ruptura que aconteça, deverá passar pelo banco anterior, que atua apoiando o pé do talude fornecendo confinamento para solos de fundação, e, o pé de cada banco é suportado na

berma superior.
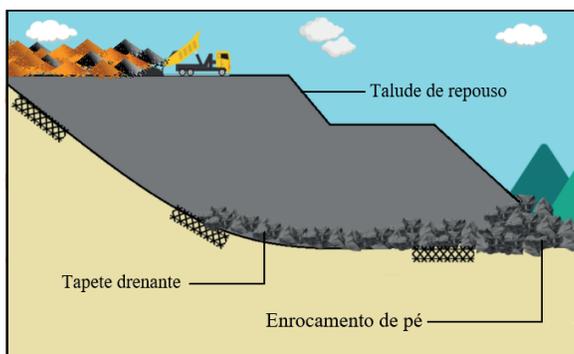
Figura 2 – Construção de uma pilha pelo método ascendente por camada. Fonte: Adaptado de FREITAS (2004).

2.1.2 Método descendente

Neste método, a camada é suportada no pé do talude anterior pela disposição de estéril a partir da cota mais alta do talude da pilha feita na altura máxima (VICTORINO, 2016). Sua construção é realizada somente com o basculamento do material por caminhão e o espalhamento por trator de esteira no ponto mais alto da pilha. Não há controle geotécnico, não é feito a compactação do aterro e nem é preparado a base para a disposição do material (COSTA, 2017), como demonstrado na Figura 3.

A estrutura das pilhas é bastante instável, sendo assim, possui alto grau de escorregamentos. Sua aplicação requer grandes restrições tornando indicada apenas para enrocamentos drenantes ou áreas confinadas (PETRONILHO, 2010). Este é considerado o método mais econômico, devido a redução da distância média de transporte (FERREIRA, 2016). A construção da pilha por este método não compreende um sistema de drenagem apropriado e não possui proteção superficial dos taludes contra a erosão, o que o torna altamente susceptível a rupturas (COSTA, 2017).
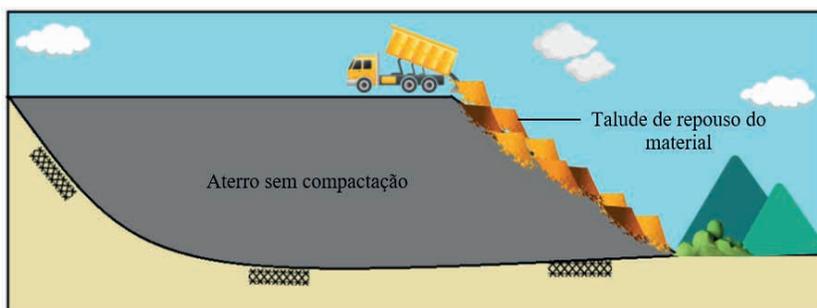
Figura 3 - Construção de uma pilha pelo método descendente. Fonte: Adaptado de FREITAS (2004).

2.2 Classificação das DCES

O sistema de classificação é uma metodologia utilizada para avaliar o comportamento das estruturas existentes e analisar fatores que afetam a estabilidade física das pilhas. Também é uma ferramenta de planejamento, pois permite realizar classificações prévias dos possíveis locais para a construção da DCE, além de estabelecer os níveis de investigação, projeto, construção e monitoramento de acordo com cada classe (ARAGÃO, 2008).

Dependendo do material, o objetivo da estrutura e a limitação física do local, é possível identificar a classificação quanto ao tipo de pilha (Figura 4). Uma pilha do tipo aterro em vale, tem o início na porção montante e a disposição do estéril segue ao longo da porção jusante. A estrutura da pilha transversal a um vale transpõe o vale, porém não o preenche. A pilha em geral, possui uma drenagem na parte inferior no intuito de controlar o armazenamento e/ou evacuação de águas pluviais. A configuração de aterro de encosta é preenchida ao longo da encosta do vale, mas sem o seu preenchimento, sua elaboração deve ser planejada e deve ser construído canais de drenagens para evitar o acúmulo de água (VICTORINO, 2016).

O depósito do tipo aterro de crista é edificado no topo de um monte, a estrutura estende para baixo, acompanhando a inclinação do terreno (COSTA, 2017). A elaboração em pilha é feita de baixo para cima e os lados do talude são totalmente preenchidos. A construção é realizada com o terreno pouco inclinado ou levemente plano.

Um sistema de classificação auxilia descrever o tipo e a configuração da DCE. Essas informações contribuem para prever o comportamento interno da pilha, investigar prováveis danos e corrigi-los. As três principais partes do sistema são: avaliação de estabilidade da pilha, classes de estabilidade da pilha e verificação de enquadramento da classe.
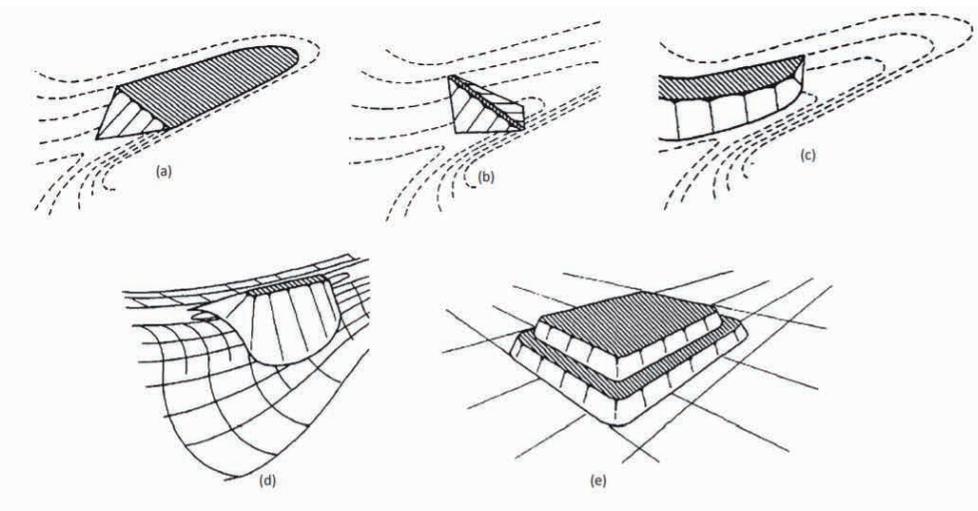
Figura 4 – Tipos de DCEs: (a) Aterro em vale; (b) Aterro transversal a um vale; (c) Aterro de encosta; (d) Aterro de crista; e (e) Pilha. Fonte: Guidelines For Mine Waste Dump and Stockpile Design (2017).

2.3 Método semiquantitativo de análise de estabilidade

2.3.1 Tabela de pontuação

A avaliação da estabilidade das pilhas pode ser realizada de forma semiquantitativa, onde o resultado estabelece uma classe de acordo com o potencial de instabilidade (Tabela 1).

<table>
<tr><th colspan="2">Fatores</th><th colspan="2">Faixa de Condições ou Descrições</th><th>Pontuação</th></tr>
<tr><td rowspan="10">Configuração da Pilha</td><td rowspan="4">Altura da Pilha</td><td colspan="2"><50m</td><td>0</td></tr>
<tr><td colspan="2">50m - 100m</td><td>50</td></tr>
<tr><td colspan="2">100m - 200m</td><td>100</td></tr>
<tr><td colspan="2">>200m</td><td>200</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Volume da Pilha</td><td>Pequeno</td><td><1 x 10^6 m^3/banco</td><td>0</td></tr>
<tr><td>Médio</td><td>1 - 50 x 10^6 m^3/banco</td><td>50</td></tr>
<tr><td>Grande</td><td>>50 x 10^6 m^3/banco</td><td>100</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Inclinação do Talude</td><td>Suave</td><td><26°</td><td>0</td></tr>
<tr><td>Moderado</td><td>26° - 35°</td><td>50</td></tr>
<tr><td>Íngreme</td><td>>35°</td><td>100</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="4">Inclinação de Fundação
Moderada
Íngreme
Extrema</td><td>Suave</td><td><10°</td><td>0</td></tr>
<tr><td>10° - 25°</td><td>50</td><td></td></tr>
<tr><td>25° - 32°</td><td>100</td><td></td></tr>
<tr><td>>32°</td><td>200</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="3">Grau de
Confinamento

Moderadamente
confinado
Sem
Confinamento</td><td>Confinado</td><td>- Talude côncavo em planta ou seção;
- Aterros em vale ou transversais a um vale, pé de talude em contato com a parede oposta do vale;
- Ravinas em forma de dente de serra suavizando a inclinação de fundação.</td><td>0</td></tr>
<tr><td>- Bancos ou terraços naturais nos taludes;
- Taludes com inclinação uniforme, limitados por topografia natural diversificada;
- Empilhamento de estéreis em encostas, em vales abertos, ou transversais a vales.</td><td>50</td><td></td></tr>
<tr><td>- Talude convexo em planta ou seção;
- Aterros de encosta ou aterros de crista sem confinamento na base;
- Sem ravinas ou bancos para auxiliar a construção.</td><td>100</td><td></td></tr>
</table>

Tipos de Fundação Intermediária Fraca	Competente	- Materiais de Fundação tão ou mais resistentes que os da pilha; - Não sujeita a efeitos adversos da poro pressão; - Sem estruturas geológicas desfavoráveis.	0
	- Intermediária entre competente e fraca; - Ganho de resistência do solo com adensamento; - Dissipação do excesso de poro pressões com o controle da taxa de carregamento.	100	
	- Capacidade de suporte limitada, solos moles; - Sujeita a excessos de poro pressão devido ao carregamento; - Condições adversas de água subterrânea, surgências ou infiltrações; - Baixa resistência ao cisalhamento, com alto potencial de liquefação.	200	
Qualidade do material da pilha Moderada Pobre	Alta	- Resistente, durável; - Menos que 10% de finos.	0
	- Moderadamente resistente, durabilidade variável; - 10 a 25% de finos.	100	
	- Predominância de rochas fracas de baixa durabilidade; - Mais que 25% de finos, material de cobertura (capeamento).	200	
Método de construção Misto Desfavorável	Favorável	- Bancos ou camadas não muito espessos (<25m de espessura), plataformas largas; - Disposição ao longo das curvas de nível; - Construção ascendente - Wrap-arounds ou terraços.	0
	- Bancos ou bancadas moderadamente espessas (25m - 50m); - Métodos mistos de construção.	100	
	- Bancos ou camadas muito espessas (>50m), plataforma estreita (aterro na forma de pontões); - Disposição abaixo da linha de queda do talude; - Construção descendente.	200	

Condições piezométricas e climáticas	Favorável	- Baixas pressões piezométricas, nenhuma surgência na fundação; - Improvável desenvolvimento de superfície freática no interior da pilha; - Precipitação limitada; - Infiltração mínima dentro da pilha; Nenhuma camada de neve ou gelo na pilha ou fundação.	0
Condições piezométricas e climáticas Desfavorável	Intermediária	- Pressões piezométricas moderadas, algumas infiltrações na fundação; - Desenvolvimento limitado da superfície freática na pilha; - Precipitação moderada; Alta infiltração no interior da pilha.	100
	- Altas pressões piezométricas, surgências na fundação; - Moderada a alta precipitação; - Significativo potencial de desenvolvimento de superfície freática ou lençol suspenso no interior da pilha.	200	
Taxa de Disposição Moderada Alta	Baixa	- < 25 m³/banco por metro linear de crista por dia; - Taxa de avanço da crista < 0,1 m por dia.	0
	- 25 – 200 m³/banco por metro linear de crista por dia; - Taxa de avanço da crista de 0,1 m – 1,0 m por dia.	100	
	- > 200 m³/banco por metro linear de crista por dia; - Taxa de avanço da crista > 1,0 por dia.	200	
Sismicidade Moderada Alta	Baixa	- Zona de risco sísmico 0 e 1 (Escala Richter).	0
	- Zona de risco sísmico 2 e 3.	100	
	- Zona de risco sísmico 4 ou maior.	200	
Pontuação máxima possível de Estabilidade da Pilha: 1800			

Tabela 1 – Tabela de pontuação de estabilidade das pilhas de estéril. Fonte: Modificado de BC Mine Waste Rock Pile Research Committee (1991)

Esse método auxilia compreender o comportamento da pilha à possíveis rupturas causadas pela sobrecarga de materiais, poro pressões e demais agentes condicionantes. O

conjunto de fatores não é fácil de ser avaliado, assim a avaliação é parcialmente subjetiva, porém o método de classificação alcança um nível aceitável de aplicabilidade e facilidade (ARAGÃO, 2008).

2.3.2 Classes de estabilidade

As classes de estabilidade definem o nível de esforço aconselhável para a investigação, projeto e elaboração da pilha, conforme Tabela 2 (ARAGÃO, 2008). Quanto maior a classe, maior será o esforço para o manejo do estéril. Caso a pilha seja definida como categoria III ou IV, não revela que ocorrerá o rompimento ou que esteja instável, apenas representa que existe um perigo potencializado (ARAGÃO & FILHO, 2011).

Classificação da Pilha	Potencial de Ruptura	Nível de esforço recomendado para investigação, projeto e construção	Pontuação
I	Desprezível	- Reconhecimento básico do local, documentação de referência; Programa mínimo de ensaios de laboratório; - Rotina de checagem de estabilidade, possivelmente usando ábacos; Restrições mínimas na construção; - Monitoramento apenas visual.	<300
II	Baixo	- Investigação completa do local; - Poços de inspeção, amostragem pode ser obrigatória; - Programa limitado de ensaios de laboratório; - Estabilidade pode ou não influenciar o projeto; - Análises básicas de estabilidade obrigatórias; - Certas restrições na construção; - Monitoramento visual e de instrumentos de rotina.	300 - 600
III	Moderado	- Investigação detalhada do local, em etapas; - Poços de inspeção obrigatórias, ou outras investigações de subsuperfície podem ser obrigatórias; - Amostragem indeformada pode ser obrigatória; - Programa detalhado de ensino de laboratório, incluindo propriedades-índice, resistência ao cisalhamento e durabilidade provavelmente obrigatórios; Estabilidade influencia e pode controlar o projeto; Análises de estabilidade detalhadas, possivelmente estudos paramétricos obrigatórios; - Projeto básico pode ser obrigatório para aprovação/ permissão; Restrições moderadas na construção (ex. taxa de carregamento limitada, espessuras das camadas, qualidade do material, drenagem superficial adequada etc.); - Monitoramento detalhado de instrumentação para confirmar o projeto, documentar performance e estabelecer limites descarregamentos.	600 - 1200

<table>
<tr>
<td rowspan="2">IV</td>
<td rowspan="2">Alto</td>
<td>- Investigação detalhada do local em etapas;
- Poços de inspeção e possíveis trincheiras obrigatórios;
-Sondagens e outas possíveis investigações subsuperficiais, provavelmente obrigatória;
- Amostragem indeformada provavelmente obrigatórias;
-Programa detalhado de ensaios, incluindo propriedades-índice, resistência ao cisalhamento e durabilidade provavelmente obrigatórios;
- Considerações sobre estabilidade essenciais;
- Análises de estabilidade detalhadas, possivelmente incluindo estudos paramétricos e avaliações completas de alternativas provavelmente obrigatórias;
-Projeto básico possivelmente obrigatório para aprovação/permissão;
- Restrições severas na construção (ex. taxas limite de carregamento, espessuras das camadas, qualidade do material drenagem superficial etc.);</td>
<td rowspan="2">>1200</td>
</tr>
<tr>
<td>- Monitoramento detalhado de instrumentação para confirmar projeto, documentar performance e estabelecer limites de carregamento.</td>
</tr>
</table>

Tabela 2 – Classificação da Estabilidade da pilha e nível de esforço recomendado. Fonte: Modificado de BC Mine Waste Rock Pile Research Committee (1991).

2.4 Métodos de monitoramento de pilhas

Uma das ações mais importantes nas operações da mina, é a avaliação dos taludes. Conhecer o ângulo de inclinação é um dos fatores principais para a abertura e manutenção dos taludes da cava e dos taludes das pilhas de estéril.

Segundo Dias (2017), existem métodos que são aplicados no monitoramento dos taludes da cava e dos bota-foras. Os métodos são medições constantes, com o objetivo de atenuar problemas geotécnicos, onde são observados movimentações ou sinais de ruptura. Algumas técnicas são descritas a seguir.

2.4.1 Método topográfico

Executado com uma estação total, são realizadas medidas colineares entre os marcos topográficos, definidos e alinhados, medindo a distância entre eles, conforme Figura 5. Possui boa confiabilidade e de baixo custo.
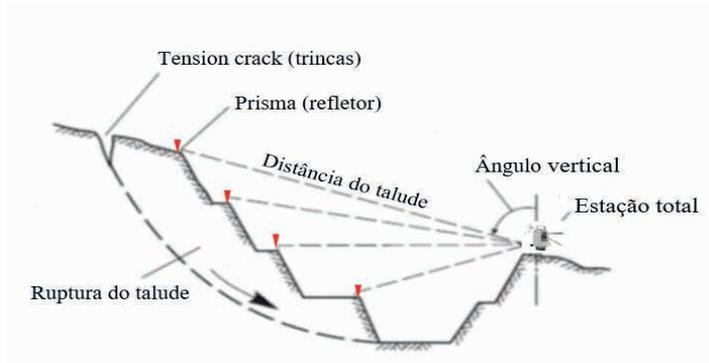
Figura 5– Esquema do método topográfico. Fonte: Modificado de Dias (2017).

2.4.2 Medidores de trincas e fendas

Servem como elementos indicativos de ruptura que estão prestes a acontecer. Os instrumentos geralmente utilizados são um fio e/ou régua metálica ou sistemas elétricos, que são postos após o desenvolvimento de trincas e fendas, de acordo com a Figura 6.
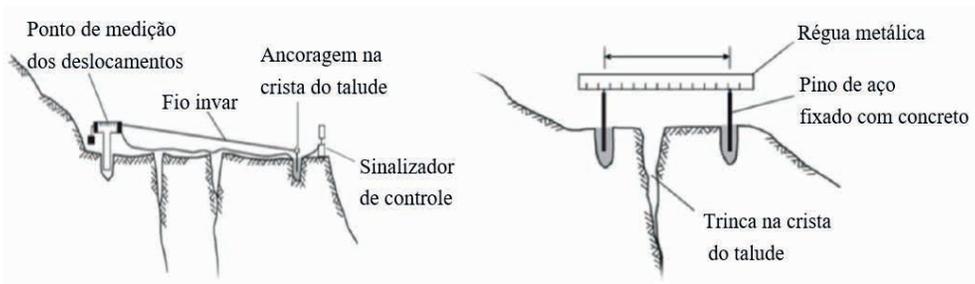
Figura 6 – Esquema do método de tricas e fendas utilizando fio invar e régua metálica. Fonte: Modificado de Dias (2017).

2.4.3 Fotografia dos taludes

Realiza-se uma série de fotografias dos taludes, demonstrado na Figura 7, posteriormente é feito uma superposição das imagens, onde é possível ao longo do tempo acompanhar possíveis variações de deslocamentos.

Figura 7 – Imagens de trincas observadas nos taludes de estéril. Fonte: Imagens da autora

2.5 Método de análise de equilíbrio limite

2.5.1 Mecanismo de ruptura circular

Ruptura circular ocorre em taludes onde não existe padrão estrutural definido e maciço rochoso fraturado que se comporta como solo. Pode ocorrer principalmente pelo peso excessivo de material depositado. Nos locais onde o maciço é exposto e não possui cobertura superficial, a presença de trincas permite a saturação e intensificação do grau de alteração, estimulando que ocorra esse tipo de ruptura.

A presença de água infiltrada é imprescindível para o desencadeamento dos movimentos de massa através da criação da frente de saturação, responsável pelo aparecimento de poro pressões (Figura 8) e a eliminação da sucção pré-existente (SILVA *et al.*, 2018).
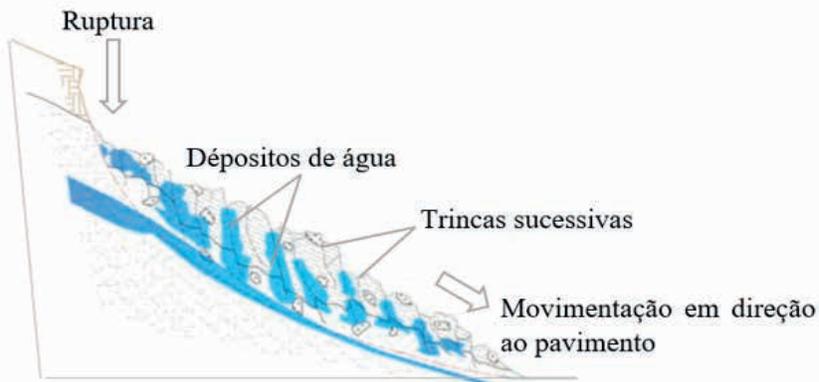
Figura 8 - Modelo geotécnico do mecanismo de ruptura do talude. Fonte: Modificado de Silva et. al (2018).

2.5.2 Cálculo do fator de segurança

As diferentes propriedades geomecânicas do maciço são consideradas para determinar o fator de segurança dos taludes. São realizadas análises que determinam se existe resistência considerável para suportar as tensões de cisalhamento que provocam as rupturas. A análise do coeficiente deve ser realizada durante o projeto de construção da pilha, pois será determinante para a estabilidade do talude. De acordo com a norma NBR 13029 (2017), deve-se adotar fatores de segurança mínimos para analisar a estabilidade das DCEs com as especificações demonstradas na Tabela 3.

Condição de Saturação	Especificações	Fator de Segurança
Condição de saturação normal (drenada)	Nível de água no contato da pilha/ fundação	1,50
Condição de saturação crítica	Elevação do nível de água no maciço da pilha	1,30
Condição de saturação normal	Estabilidade dos taludes entre as bermas	1,50

Tabela 3 – Especificações de fatores de segurança mínimo em condições de saturação normal e crítica. Elaborado pela autora.

O fator de segurança considera as características de coesão, coeficiente de atrito, densidade do material e a geometria dos taludes e é estabelecido como a relação entre a resistência ao cisalhamento do material (S) e a tensão que age sobre ele (t), conforme a Equação 1:

$$FS = \frac{S}{t} \qquad (1)$$

As rupturas iniciam quando as forças mobilizantes excedem interinamente as forças resistentes. As forças externas de um modo geral são relacionadas ao desmonte, eventos sísmicos, precipitação pluvial e pela pressão d’água subterrânea.

3 I MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada consiste em pesquisa de informações através de laudos geológicos realizados no local de estudo, licenças de operações, acompanhamento de desenvolvimento das DCEs R3, R4 e R5 através de imagens de satélite temporais, demonstrando a sequência evolutiva das pilhas, conforme Figura 9.

Para as avaliações de campo foi necessário o uso de câmera fotográfica, veículo aéreo não tripulado (*drone*), smartphone, fita métrica, régua, mapas, GPS (*Differential Global Positioning System*) e prancheta. O desenvolvimento consiste nas etapas de planejamento da área de voo, obtenção das imagens aéreas e processamento destas, gerando o modelo virtual de superfície utilizando fotogrametria através do software Agisoft MetaShape Pro®.

Para o cálculo do fator de segurança das superfícies, foi utilizado o software Hyrcan. O software é gratuito e permite analisar a estabilidade dos taludes em 2D.
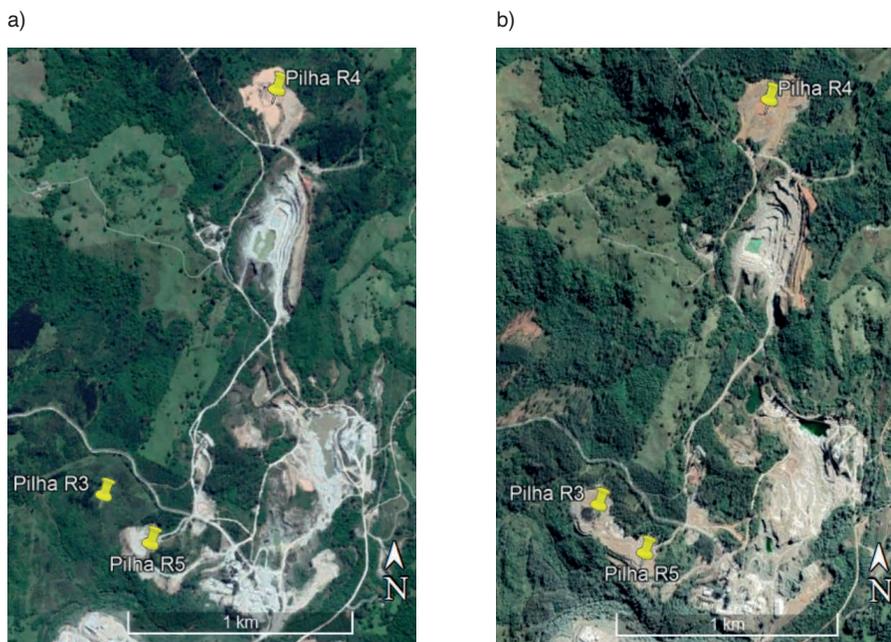
Figura 9 – Desenvolvimento das DCEs (bota-foras). (a) 2016, (b) 2021. Fonte: Modificado de GOOGLE EARTH (2021).

3.1 Pesquisa documental

Nesta etapa foi realizado um compilado histórico construtivo das DCEs, frequência e período de descarte de material nos bota foras da mineradora. As informações necessárias foram obtidas internamente na empresa através de visitas e consulta a materiais de pesquisas realizadas anteriormente.

3.2 Inspeção visual

Foram realizadas inspeções visuais de campo utilizando câmeras fotográfica e *drone* para o registro e identificação de possíveis áreas críticas nas DCEs. As imagens obtidas ajudaram a constatar e mensurar trincas e possíveis riscos de desabamento.

3.3 Classificação de estabilidade

Foi aplicado inicialmente o método semiquantitativo para classificação da estabilidade das pilhas, e verificação do FS por equilíbrio limite. A classificação e verificação do fator de segurança atualizado, permitirá tomadas de decisões para manutenção e melhorias na estabilidade dos bota-foras da mineradora.

3.4 Voos e processamento das imagens

A primeira ação realizada foi o planejamento das rotas de voo das áreas de interesse, a definição das coordenadas de localização e definição do ponto de decolagem e pouso foi realizada com o software *Copterus®* disponível para dispositivos móveis com sistema operacional iOS. A aquisição das imagens aéreas foi feita utilizando o drone, modelo *DJI Mavic Air* 2, equipado com câmera de resolução 24 megapixels.

Foi realizado um voo para a DCE R4 e um para as DCEs R3 e R5, essas estão localizadas adjuntas e as imagens analisadas e processadas foram realizadas concomitante. Os voos foram definidos com uma resolução espacial (*Ground Sample Distance – GSD*) de 1.9 cm/pixel, sobreposição lateral de 60%, sobreposição frontal de 80%, angulação da câmera de 90º, altura de voo de 50 m e finalizando com 370 e 434 imagens respectivamente em cada voo.

As imagens obtidas em campo foram importadas utilizando o software *Agisoft MetaShape Pro®*, onde foi possível criar a sobreposição e nuvem de pontos para visualização do modelo 3D. Com a nuvem de pontos foi possível determinar a topografia do local das DCEs, a inclinação dos taludes e o volume de cada pilha.

4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após o processamento das imagens e inspeção visual no local do estudo, as informações relevantes para classificar as DCEs de acordo com a probabilidade de instabilidade foram obtidas e apresentadas nas Tabelas 4 e 5.

Para as DCEs R3 e R5, a qualidade do material é alta, possuindo menos que 10% de finos. Para o cálculo da taxa de disposição, foi considerado o perímetro da área de 1.597m e o raio equivalente de 254m, com volume total de 1,87x10^{6} m³. Comparando as imagens de avanço das pilhas pelo Google Earth, considerou-se que as DCEs têm aproximadamente 6 anos de atividade, pressupondo que a mineradora trabalhe 240 dias/ano, o total de dias trabalhados durante esse período é de 1.440. Desse modo, a taxa de avanço da crista com a disposição de material é de 0,35m/dia.

No que se refere a DCE R4, o volume da pilha foi considerado pequeno, devido a disposição de material acompanhar a safra da soja, sendo realizada em períodos sazonais. A qualidade do material é pobre, possuindo mais que 25% de finos, resultado da disposição de material de capeamento. O perímetro da área é de 1.265m e o raio equivalente de 201m, o volume total é de 0,44x10^{6} m³. Considerando o período de atividade de 12 anos, o total de dias trabalhados é de 2.880, assim a taxa de avanço diário equivale a 0,14m/dia

Para ambos os casos, admitiu-se que não há grau de confinamento, já que o talude é convexo em planta ou seção. A resistência da fundação foi considerada intermediária, pois há ganho de resistência do solo com o adensamento do que é depositado. O método de construção foi avaliado como favorável a misto, obtendo 50 na pontuação, já que as

camadas não são muito espessas e possui métodos mistos de construção. As condições piezométricas e climáticas foram consideradas favoráveis, visto que é improvável o desenvolvimento de superfície freática no interior da pilha. A sismicidade foi considerada baixa, não havendo nenhuma zona de risco sísmico.

Com os resultados obtidos da pontuação de estabilidade das pilhas, as DCEs R3 e R5 somaram 450 pontos e a DCE R4 somou 650. Com esse total, foi possível identificar a classificação da estabilidade das pilhas quanto ao potencial de ruptura e nível recomendado para investigação e monitoramento.

Fatores		Faixa de condições obtidas nas DCE R3 e R5	Pontuação
Configuração da Pilha	Altura da Pilha	24,0 m	0
	Volume da Pilha	Médio: $1,87x10^6$	50
	Inclinação do Talude	Moderado: 31,4º	50
Inclinação de Fundação		Suave	0
Grau de Confinamento		Sem Confinamento	100
Tipos de Fundação		Intermediária	100
Qualidade do material da pilha		Alta	0
Método de construção		Favorável a Misto	50
Condições piezométricas e climáticas		Favorável	0
Taxa de Disposição		Moderada: 0,35 m/dia	100
Sismicidade		Baixa	0
Pontuação de Estabilidade das Pilhas R3 e R5: 450			

Tabela 4 – Tabela de resultados obtidos da pontuação de estabilidade das DCEs R3 e R5.

Fatores		Faixa de condições obtidas na DCE R4	Pontuação
Configuração da Pilha	Altura da Pilha	41,3 m	0
	Volume da Pilha	Pequeno: $0,44x10^6$	0
	Inclinação do Talude	Íngreme: 37,3º	100
Inclinação de Fundação		Suave	0
Grau de Confinamento		Sem Confinamento	100
Tipos de Fundação		Intermediária	100
Qualidade do material da pilha		Pobre	200
Método de construção		Favorável a Misto	50
Condições piezométricas e climáticas		Favorável	0
Taxa de Disposição		Moderada: 0,14 m/dia	100
Sismicidade		Baixa	0
Pontuação de Estabilidade da Pilha R4: 650			

Tabela 5 – Tabela de resultados obtidos da pontuação de estabilidade da DCE R4.

As DCEs R3 e R5 se enquadraram na classe II, onde o potencial de ruptura é baixo, porém é necessário que o local seja monitorado visualmente e realizado análises básicas de estabilidade. A DCE R4 possui um potencial de ruptura moderado, sendo preciso realizar monitoramento um pouco mais detalhado, definindo se uma taxa limite de deposição de material e controle de drenagem superficial.

4.1 Verificação do fator de segurança

Para a verificação do potencial de estabilidade, foi empregado o método de equilíbrio limite definindo o fator de segurança das DCEs. Para isso, foi utilizado o software gratuito *Hyrcan®* para calcular o FS através do método Bishop simplificado, que analisa onde há potencial de ruptura circular, subdividindo as superfícies de análise em fatias verticais. As propriedades dos materiais foram consideradas segundo parâmetros de bibliografia, sendo definidos as propriedades para o material estéril depositado e as propriedades da base de fundação. Para o material estéril a coesão utilizada foi de 100 kPa e ângulo de atrito de 35º. Já para o material correspondente a fundação rochosa foi de 5000 kPa e ângulo de atrito de 35º. O peso específico do estéril foi definido em 22 kN/m^3 e do material rochoso da fundação 26 kN/m^3. O nível freático foi considerado no contato entre o material estéril e a fundação.

Para as DCEs R3 e R5 no sentido da direita para esquerda (Figura 11), o FS encontrado foi de 4,051 e a porção analisada foi dividida em 26 fatias. Nesse sentido a largura mais espessa da fatia tem 3,47m e a menor tem 1,29m.
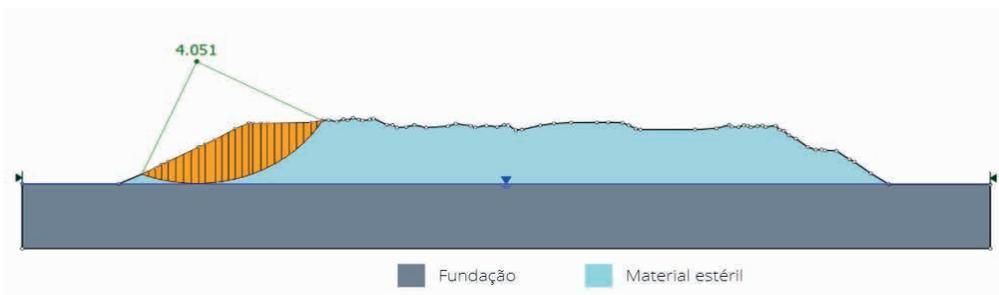
Figura 11 – Fator de segurança encontrado nas DCEs R3 e R5, no sentido direita para a esquerda.

No sentido inverso, o valor encontrado foi de 3,421, contendo o total de 28 fatias, sendo a mais espessa com 2,73m e com 0,84m a menos espessa, conforme a Figura 12.
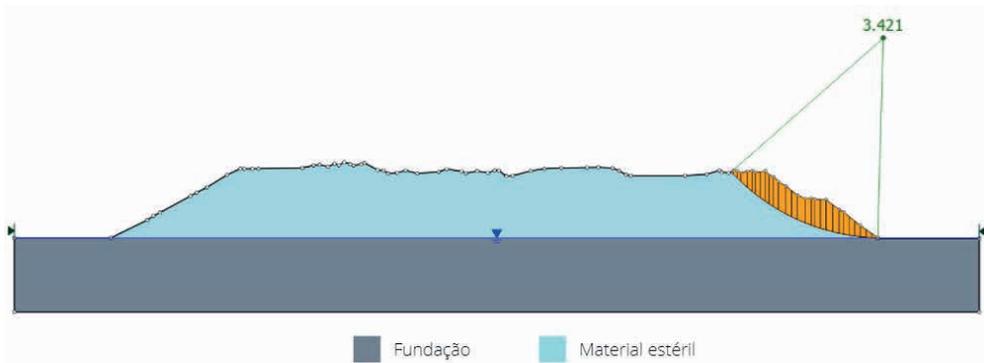
Figura 12 – Fator de segurança encontrado nas DCEs R3 e R5, no sentido esquerda para direita.

Para a DCE R4 no sentido direita para a esquerda, como demonstrado na Figura 13, o FS encontrado foi de 3,459 e a porção analisada de estabilidade foi dividida em 27 fatias. A porção mais espessa possui 6,79m e a menor tem 0,76m.
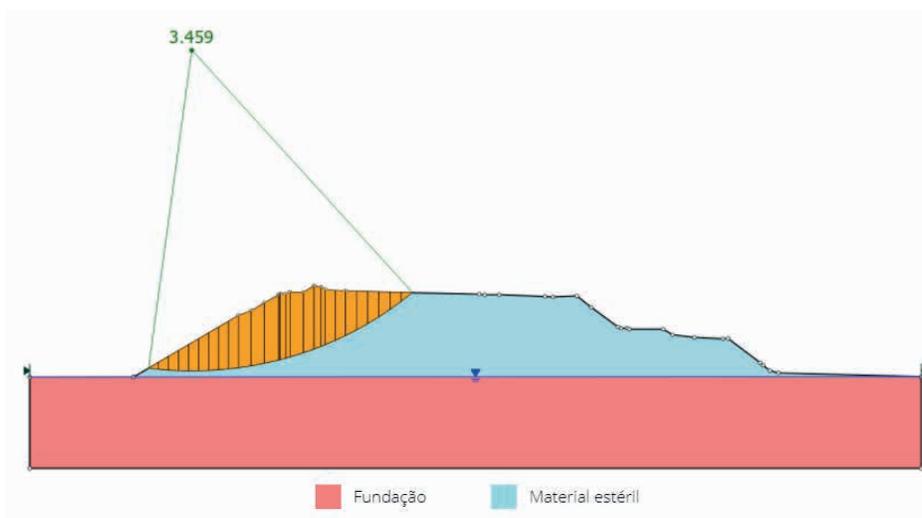
Figura 13 – Fator de segurança encontrado na DCE R4, no sentido direita para esquerda.

No sentido esquerda para direita da DCE R4, o FS encontrado foi de 5,320, a porção de estabilidade contém 33 fatias, a mais espessa tem 12,66m e a menor possui 1,13m, representado na Figura 14.
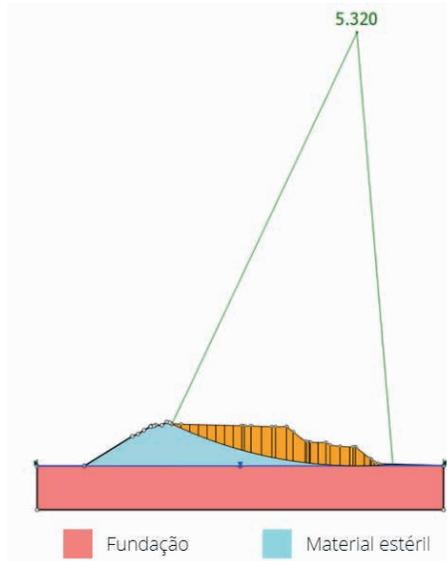
Figura 14 – Fator de segurança encontrado na DCE R4, no sentido esquerda para direita.

Os fatores de segurança calculados mostraram-se satisfatórios e sugerem grande estabilidade. Porém, ainda que a estabilidade dos taludes das DCEs esteja garantida, alguns pontos requerem atenção devido à drenagem, o que produz erosão superficial e pode desencadear um processo de desestabilização a longo prazo (Figura 15).
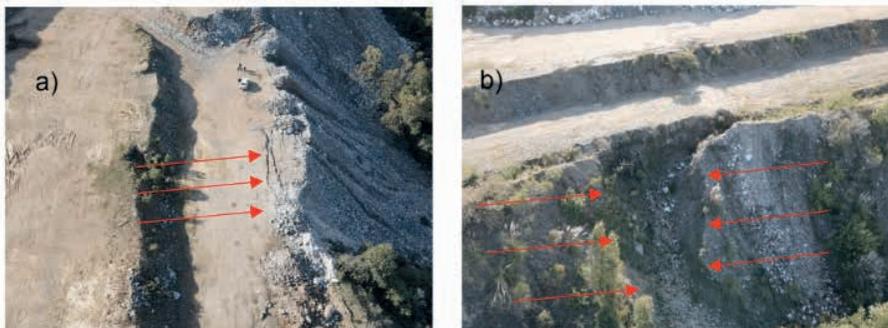
Figura 15 – Fotos áreas da DCE R4, (a) trincas observadas na crista do talude (b) erosões na face do talude da pilha devido a drenagem ineficiente.

5 I CONCLUSÕES

Após o estudo realizado, concluiu-se que a classificação semiquantitativa de estabilidade de DCEs é uma ferramenta útil na avaliação dos fatores que afetam a estabilidade. Porém, esse sistema não pode ser visto como uma análise completa de estabilidade. Os cálculos dos FSs devem ser realizados de forma complementar. Se sugere

ainda um monitoramento topográfico e visual de trincas e fendas de forma a identificar futuras modificações do estado atual. Quanto aos processos erosivos ocasionados pela pluviosidade, a construção de uma drenagem superficial, por meio de canaletas, seria eficiente para conduzir a água para um local apropriado onde se reduz a infiltração nos taludes.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Sistema de Informação Geográfica da Mineração – SIGMINE.**

ARAGÃO, G. A. S. **Classificação de pilhas de estéril na mineração de ferro.** 2008. 133 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

ARAGÃO, G. A. S.; OLIVEIRA FILHO, W. L. Classificação de pilhas de estéril na mineração de ferro**. Revista Escola de Minas**, Ouro Preto , v. 64, n. 2, p. 193-198, abr-jun. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13029**: Elaboração de projetos para disposição de rejeitos e estéreis em mineração. 2017.

BC MINE. **Mined Rock and Overburden Piles.** Investigation and Desing Manual. Vancouver: Piteau Associates Engineering.,1991. 177 p.

COSTA, B. S. **Simulação de alternativas locacionais de depósito de estéril para uma mina de fosfato.** 2017. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia de Minas) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2017.

DIAS, R. A. **Laudo Geotécnico:** da cava atual e final unidade mineira Matriz Linhares. Caçapava do Sul, 2017. Relatório técnico realizado na Irmãos Cioccari & cia LTDA. 67p.

DIAS, R. A. **Laudo Geotécnico:** da cava atual e final unidade mineira Fida.

DNPM: nº822.256/1969. Caçapava do Sul, 2018. Relatório técnico realizado na Irmãos Cioccari & cia LTDA. 66p.

FERREIRA, F. A. B. **Pilha de estéril: dimensionamento e classificação.** 2016. 89 f. Monografia (Especialização) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2016.

FORGEARINI, R. G.; OLIVEIRA NETO, R.; SOUZA, L. E.; ABICHEQUER, L. A.; GONÇALVES, I. G. Metodologia de avaliação ambiental na análise de alternativas locacionais de pilhas de estéril. **Revista Monografias Ambientais**, Santa Maria, v.14, Ed. Especial Unipampa, p.80-97. 2015.

FREITAS, M. A. Apostila sobre formação de pilhas de estéril e rejeito. Belo Horizonte: Editora Ietec, 2004.

HAWLEY, M.; CUNNING, J. Introduction. In: Guidelines for Mine Waste Dump and Stockpile Desing. Austrália: CSIRO Publishing, 2017. Cap. 1, p 9.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Portal de mapas do IBGE - Malhas territoriais / 2020.**

NUNES, D. R. **Comportamento geotécnico de pilha de estéril formada pelo método de disposição por correia.** 2014. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.

PETRONILHO, M. R. **Avaliação do comportamento geotécnico de pilhas de estéril por meio de análise de risco.** 2010. 173 f. Dissertação (Mestrado em Geotécnica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

ROBERTSON, A. M.; STEFFEN & KIRSTEN. **Mine waste disposal: An update on geotechnical and geohydrological aspects**. 1985. 24 f. Dissertação. Vancouver, Canadá, 1985.

SILVA, E. M. **Análise de estabilidade de taludes em solos de alteração de rochas metamórficas do quadrilátero ferrífero.** 2006. 143 f. Dissertação (Magister Scientiae) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2006.

SILVA, R. C.; COSTA, D.P.; EHRLICH, M. Movimentação de rastejo e proposta de estabilização de um depósito de solo residual de filito. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA E DESENVOLVIMENTO URBANO, 19, 2018, Salvador. **Anais Eletrônicos**… Salvador: ABMS, 2018.

VICTORINO, H. S. Análise de deformação em pilhas de disposição de estéril (NWI, W E SIV) no complexo minerador de Carajás com uso de dados Stripmap do satélite Terrasar-X. 2016. 146 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, São José dos Campos, São Paulo, 2016.

WILDNER, W. Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul, escala 1:750.000 / Wilson Wildner; Gilberto Emílio Ramgrab; Ricardo da Cunha Lopes; Carlos Moacyr Fontoura Iglesias – Porto Alegre: CPRM, 2008. 1 DVD.

CAPÍTULO 3

ANÁLISE DE ESTABILIDADE EM TALUDES ROCHOSOS PELO MÉTODO Q-SLOPE NO MUNICÍPIO DE CAXIAS DO SUL/RS

Data de submissão: 02/05/2023 *Data de aceite: 02/06/2023*

Vitor Brandão Veloso
Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA
Caçapava do Sul – RS
http://lattes.cnpq.br/4443218617142832

Diogo Peixoto Cordova
Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA
Caçapava do Sul – RS
http://lattes.cnpq.br/2354744565105719

RESUMO: O presente trabalho teve como objetivo classificar um maciço rochoso pelo método Q-Slope, indicando ângulos favoráveis ao talude. Os resultados mostraram que das nove faces analisadas, cinco apresentaram-se estáveis e quatro apresentaram-se instáveis ao método. O método mostrou-se uma ferramenta prática e eficiente para os maciços rochosos pouco alterados e homogêneos, mostrando resultados aplicáveis na prática. Entretanto, para determinações em casos mais complexos, como em taludes compostos por saprólitos, o resultado apresentou alguma discrepância entre os ângulos de face recomendados e aplicabilidade real desses ângulos. Isto é evidenciado principalmente na face W01 onde o ângulo indicado de 25º é praticamente o ângulo de repouso de materiais inconsolado, como solos arenosos. Desta forma se sugere que nos casos mais complexos o método Q-Slope deve ser usado juntamente com outros métodos de classificação para a descrição detalhada e uma avaliação mais condizente com a realidade do problema.

PALAVRAS-CHAVE: métodos empíricos, estabilidade de taludes, classificação geomecânica.

SLOPE STABILITY ANALYSIS USING Q-SLOPE METHOD IN THE CITY OF CAXIAS DO SUL/RS

ABSTRACT: The present work aimed to perform an analysis of the geomechanical properties that drive the structural behavior of the slope, in relation to its stability, as well as classify the rock mass by the Q-Slope method, indicating favorable angles to the slope face. The study area corresponds to rock slopes in the city of Caxias do Sul/ RS. The results showed that of the nine analyzed faces, five were stable and four were unstable to the method. With the application of the method, it was possible to indicate favorable angles to the slope

faces. The method proved to be a practical and efficient tool for rock masses little altered and homogeneous, showing results applicable in practice. However, for determinations in more complex cases, such as slopes composed of saprolites and poor rock, the result showed some discrepancy between the recommended face angles and the real applicability of these angles. This is evidenced mainly in the face W01 where the indicated angle of 25 degrees is practically the angle of repose of unconsolidated materials, as sand soils. Thus, it is suggested that in more complex cases the Q-slope method should be used together with other classification methods for a detailed description and an assessment more consistent with the reality of the problem.
KEYWORDS: *empirical methods, slope stability, geomechanical classification.*

1 I INTRODUÇÃO

Na implantação de loteamentos residenciais, um dos pontos mais observados é a viabilidade geotécnica, pois áreas com altos declives, como encontrado em regiões serranas, podem necessitar de modificações no relevo da área gerando gastos que podem inviabilizar o projeto.

Para Borsatto (2011), a cidade de Caxias do Sul/RS sofre com problemas geotécnicos decorrentes da dinâmica social, geomorfologia e devido às características das rochas e estruturas geológicas que compõem o subsolo urbano. A cidade faz parte dos 959 municípios que possuem histórico de registros de desastres naturais em decorrência de movimentos de massa e ou processos hidrológicos e são monitorados pelo CEMADEN (Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais). Esses registros incluem deslizamentos de encosta, queda e rolamento de blocos rochosos e processos erosivos (CEMADEN, 2021).

O tema observado no mundo todo motivou pesquisadores a se dedicarem em desenvolver métodos para classificar e avaliar as condições geotécnicas, a fim de que se proceda com medidas a prevenir, impedir ou mitigar qualquer risco eminente e se obter um cenário seguro principalmente no que diz respeito à vida das pessoas.

Dentre os métodos empíricos mais utilizados no mundo, está o sistema de classificação de maciços rochosos RMR (*Rock Mass Rating*), desenvolvido por Bieniawski (1976, 1989) e o sistema Q de Barton (1976) que foram empregados largamente em análise de maciços rochosos no ramo da mineração e construções de túneis. Esses métodos sofreram adaptações com o passar dos anos, no entanto, sempre houve uma carência de análise que predita ajuste no ângulo do talude de forma prática e que evita o retrabalho por corte em ângulos inadequados (BAR e BARTON, 2017). Assim, Barton e Bar (2015) introduziram o método Q-Slope para suprir essa carência. O método é derivado de adaptações no sistema Q de Barton, utilizado há mais de 40 anos na mineração e em construções de túneis. O método foi concebido para avaliar cortes em rocha de forma a possibilitar um ajuste no ângulo do talude a partir da análise empírica da face exposta.

O RQD *(Rock Quality Designation)* é o primeiro parâmetro analisado tendo sido

desenvolvido por Deere em (1967), baseado na verificação de fraturas em testemunhos de sondagem. Mais tarde, Priest e Hudson (1976), apresentaram uma forma de se estimar o valor do RQD por meio da medida do espaçamento das descontinuidades na face do talude, o que definiram como RQD', técnica que será utilizada nesse trabalho.

Os parâmetros Jn, Jr e Ja continuam praticamente inalterados do clássico sistema Q, porém no Q-Slope pode-se atribuir à razão (Jr/Ja) o fator "O" que corresponde à orientação e pode ser aplicado para cada lado de uma possível ruptura em cunha já o Jw e SRF foram os parâmetros mais modificados, estando agora atribuídos às condições ambientais que atuaram sobre o talude e os fatores que reduzem à resistência a ruptura (BAR e BARTON, 2017).

Neste trabalho cada um dos parâmetros supracitados, foi determinado a partir do levantamento sistêmico das descontinuidades do talude pelo método de *Scanline*, descrito em Brady e Brown (1985).

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal determinar as propriedades geomecânicas que conduzem o comportamento estrutural de um talude rochoso, a respeito de sua estabilidade e classificar o maciço pelo método Q-Slope indicando os maiores ângulos que podem ser adotados para as faces dos taludes. Para cumprir com o objetivo geral, foi necessário alcançar os seguintes objetivos específicos:

- Levantamentos de descontinuidades do maciço rochoso;
- Determinar as propriedades geotécnicas em ensaios in situ;
- Identificar o mecanismo de ruptura, se planar, cunha, de tombamento ou circular;
- Classificar o maciço rochoso no sistema Q-Slope e indicar ajustes nos ângulos de talude.

1.2 Área estudo de caso

Localizada a sul do perímetro urbano do município de Caxias do Sul, no estado do Rio Grande do Sul, a área do estudo (Figura 1) corresponde a quadra 5828, da Estrada do Imigrante no bairro Nossa Senhora das Graças.
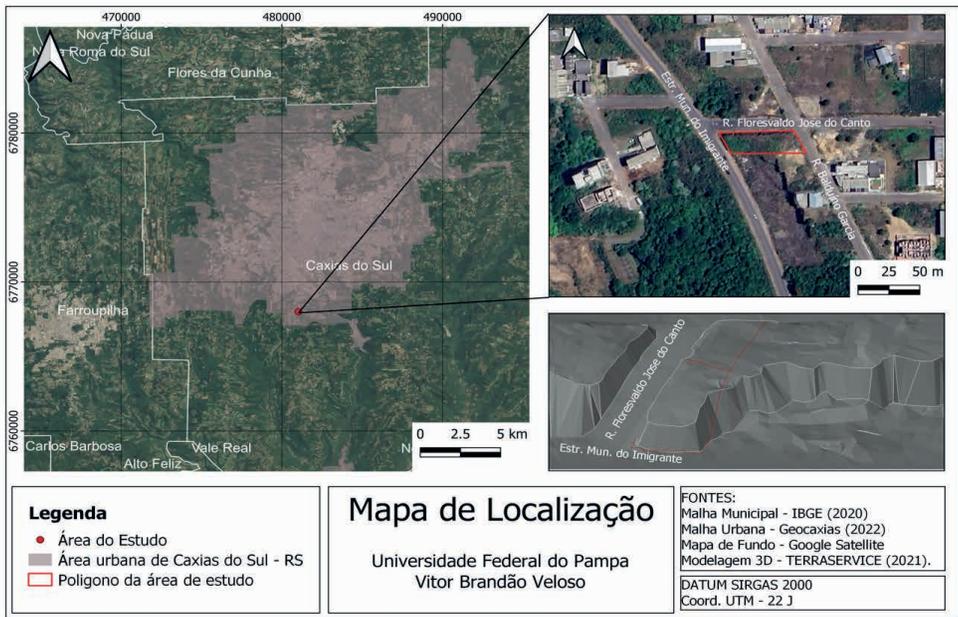
Figura 1. Mapa de Localização da área do estudo.

De acordo com levantamento aerofotogramétrico (Figura 2) realizado nos anos de 2011 e 2018 disponibilizadas pela Prefeitura Municipal de Caxias do Sul, no sítio eletrônico GeoCaxias, é possível observar por meio de imagens históricas, os cortes dos taludes para implantação do Projeto Urbanístico.

Figura 2. Imagens mostrando a evolução dos cortes ao longo dos anos gerando o talude. – Portal GeoCaxias.

2 I GEOLOGIA

A geologia regional da área corresponde à porção sudeste da Bacia do Paraná. De acordo com Zalán et al. (1987) a bacia teve acumulação de rochas sedimentares e vulcânica entre o siluriano e o cretáceo, sobre a bacia está a Formação Serra Geral, que representa umas das maiores manifestações vulcânicas do mundo, segundo Nardy, Machado & Oliveira (2008).

O município de Caxias do Sul está inserido na unidade geológica Formação Serra Geral, que recobre toda a metade norte do Estado do Rio Grande do Sul, e é representada por uma sucessão de derrames de lavas. São aflorantes no município, rochas vulcânicas dessa formação e arenitos da Formação Botucatu (BRESSANI et al., 2005).

No município de Caxias do Sul, segundo classificação geoquímica e lito estratigráfica de Nardy, Machado e Oliveira (2008), ocorrem rochas da Fácies Caxias e Gramado. Posteriormente, tais fácies foram subdivididas para unidades geológico - geotécnicas, segundo o Mapa de Unidades Geotécnicas da Área Urbana do Município de Caxias do Sul, visto nas (Figura 3) (BORSATTO, 2011 *apud* BRESSANI et al, 2005). Na área estudada, afloram apenas rochas da Fácies Caxias, caracterizadas por coloração cinza, por vezes, vermelho acastanhado, afírica, com textura variando de hipohialinas a holohialinas e aspecto “sal & pimenta”, variando de intermediárias à ácidas.

Bressani et al. (2005) descreve que as rochas dessa unidade apresentam um

aspecto maciço com disjunções tabulares medindo cerca de 30 cm de espessura. Também foram observados estratos tabulares sub-horizontais na porção basal dessa unidade, com espessuras de 5 a 30 cm.
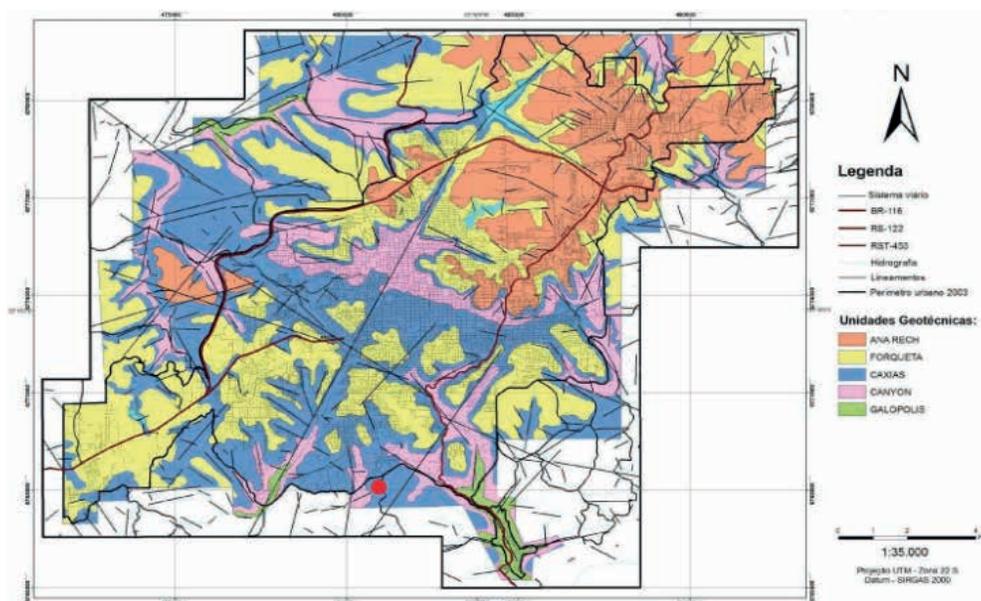
Figura 3. Mapa geológico-geotécnico de Caxias do Sul - Adaptado de (BORSATTO et al., 2012).

3 | O MÉTODO Q-SLOPE

Bar & Barton (2015) desenvolveram o método *Q-Slope*, utilizando mais de 400 estudos de casos ao redor de mundo em rochas ígneas, sedimentares e metamórficas, além de alguns saprólitos desses tipos de rocha. De acordo com os autores, a proposta do *Q-Slope* é permitir que os engenheiros geotécnicos tivessem acesso em campo, às condições de estabilidade de taludes escavados em rocha (Figura 4), e possam fazer ajustes aos ângulos de inclinação assim que as condições geotécnicas do maciço rochoso vão se tornando visíveis durante o processo construtivo. Inicialmente, o método é aplicável para tomadas de decisão quanto a ângulos de face em minas a céu aberto, mas também pode ser empregado em obras de engenharia civil (BAR; BARTON, 2017).

O método *Q-Slope* requer a atribuição de classificações para designação de qualidade de rocha *RQD*, número de família de descontinuidades *Jn*, número de rugosidade *Jr* e número de alteração da junta *Ja*, que permanecem inalterados do sistema Q (Barton et al., 1974).

$$Q_{slope} = \frac{RQD}{J_n} \; x \left(\frac{J_r}{J_a}\right)_0 \; x \; \frac{J_{wice}}{SRF_{slope}} \tag{1}$$

A qualidade do maciço rochoso no *Q-Slope* pode ser considerada uma função de três parâmetros, que são medidas brutas de:

Tamanho do bloco	$\left(\frac{RQD}{Jn}\right)$	(2)
Resistência ao cisalhamento ou	$\left(\frac{Jr}{Ja}\right)$	(3)
Resistência ao cisalhamento médio, no caso de cunhas	$\left(\frac{Jr}{Ja}\right)_1 \text{x} \left(\frac{Jr}{Ja}\right)_2$	(4)
Fatores externos e estresse	$\left(\frac{J_{wice}}{SRF_{slope}}\right)$	(5)

Já a resistência ao cisalhamento é dada pela equação (6) a seguir:

$$\tau \approx \sigma_n \tan -1 \left(\frac{J_r}{J_a}\right) \tag{6}$$

Barton e Bar (2015) desenvolveram uma fórmula simples para avaliar as condições de estabilidade de um talude rochoso a partir do método *Q-Slope*, assim deve-se dispor de dois valores: o valor do *Q-Slope* e o valor de β, sendo este o ângulo de inclinação do respectivo talude.

$$\beta = 20 log_{10} Q_{slope} + 65° \tag{7}$$

Caso o talude já tenha sido escavado e o objetivo seja avaliar a sua estabilidade pelo método, o valor de β a ser utilizado será o ângulo de inclinação do talude no momento da avaliação. Para os casos em que se deseja realizar uma retroanálise ou conhecer a maior inclinação possível para que o talude seja classificado como estável, os autores propõem a Equação 7.

Considerando apenas os taludes quase estáveis, ou seja, que o resultado do *Q-Slope* se encontra na zona de incerteza na probabilidade de falha (PoF) pode ser calculada.
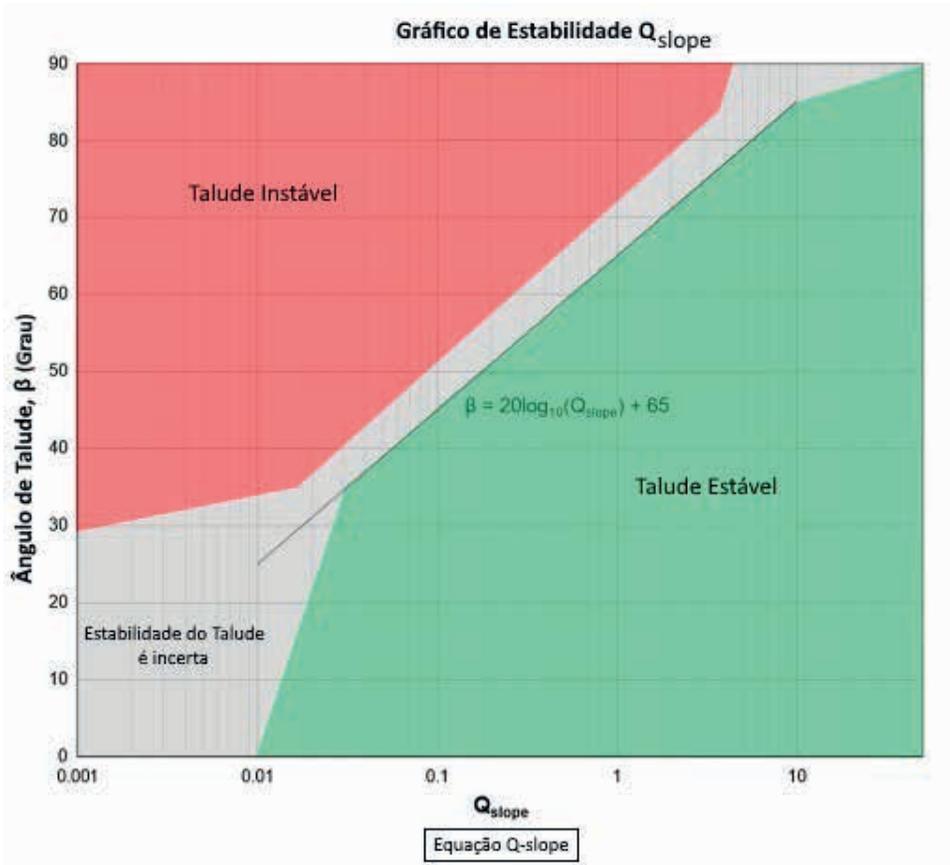
Figura 4. Gráfico de estabilidade *Q-Slope* - Modificado de Barton e Bar 2015.

4 I MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia empregada consistiu na divisão do talude em nove faces (Figura 5) onde foram realizados levantamentos das descontinuidades pelo método de *Scanline*, descrito em Brady e Brown (1985). As alturas dos taludes são apresentadas nos perfis de elevação: A-A’, B-B’, C-C’ e D-D’ (Figura 6).
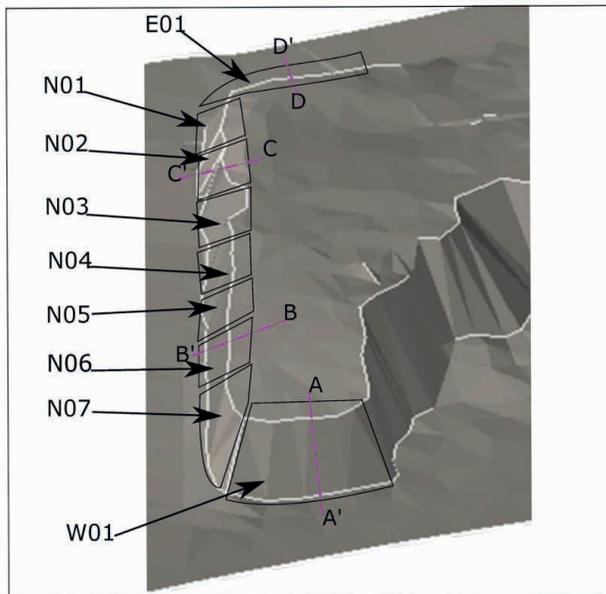
Figura 5. Divisão dos taludes em faces e indicativo dos locais dos perfis de elevação.
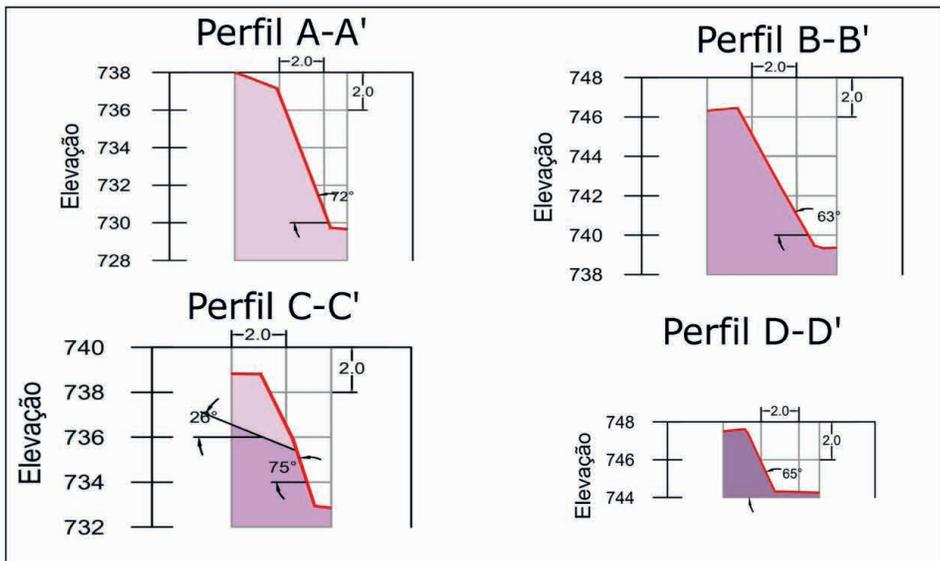
Figura 6. Perfis de elevação.

Em detalhe, foram determinados *o Rock Quality Designation* modificado (RQD'), análise cinemática para a identificação dos mecanismos de ruptura, grau de alteração das paredes das famílias de descontinuidades e análises dos fatores externos que influenciam na estabilidade dos taludes.

Figura 7. Levantamento de campo do dia 19/02/2022.

Foram desempenhados os dias 18/12/2021 e 19/02/2022 para a coleta de dados em campo (Figura 7) e os dados foram registrados em planilha (Figura 8) previamente preparada para ao método *Q-Slope*. Os materiais utilizados em campo foram o martelo de *Schmidt*, rugosímetro (pente de Barton), tinta *spray*, trena de 30 metros de comprimento, martelo petrográfico, marreta, material de escritório e tabelas de consulta.

Planilha para levantamento geotécnico Q-Slope

Data: ____/______/________		Nº da janela		Coord. (UTM)	
Tamanho Horizontal (m)		Strike Talude (°)		X	Y
Tamanho Vertical (m)		Ângulo do Talude (°)			

Estimativa de RQD'	
Nº Total de Fraturas	
Nº de fraturas por metro (λ)	
RQD'	

$RQD' = 100e^{-0,1\lambda}x(0,1\lambda + 1)$

J_{wice}	Ambiente úmido	Ambiente tropical
Estrutura estável; rocha competente.	0.7 ( )	0.5 ( )
Estrutura estável; rocha incompetente.	0.6 ( )	0.3 ( )
Estrutura instável; rocha competente.	0.5 ( )	0.1 ( )
Estrutura instável; rocha incompetente.	0.3 ( )	0.05 ( )

Parâmetros			
Ja_1	Jr_1	$Fator\ O_1$	
Ja_2	Jr_2	$Fator\ O_2$	
SFRa	SFRb	SFRc	SFR SLOPE
Q_{slope}			

$$Q_{slope} = \frac{RQD}{Ja} x \left(\frac{Jr}{Ja}\right)_0 x \frac{J_{wice}}{SFR_{slope}}$$

Nº	Jn / Fator O		Jwice		Jr	Ja
	Mergulho (°)	Strike (°)	Martelo Schmidt	Orientação do martelo	Valor de acordo com a tabela 5	Valor de acordo com a tabela 1
1						
2						
3						
4						

Figura 8. Planilha para levantamento geotécnico.

5 I RESULTADOS E DISCUSSÕES

O trabalho buscou descrever e interpretar características geotécnicas que induzem ao comportamento geomecânico dos taludes em questão e contou com a realização de levantamento de descontinuidades com foco nos parâmetros necessários na classificação *Q-Slope.*

Os resultados do *Q-Slope* mostram uma variação significativa, com valores decrescentes de leste a oeste da área de estudo, sendo o valor máximo para a face E01 com 9.80 e o valor mínimo 0.01 na face W01 (Figura 10). Após calcular o *Q-Slope* para cada face do talude, foi possível plotar no gráfico (Figura 9) que relaciona o resultado com o ângulo do talude. Desta forma, as faces N05, N06 N07 e W01 caíram no campo de instabilidade.
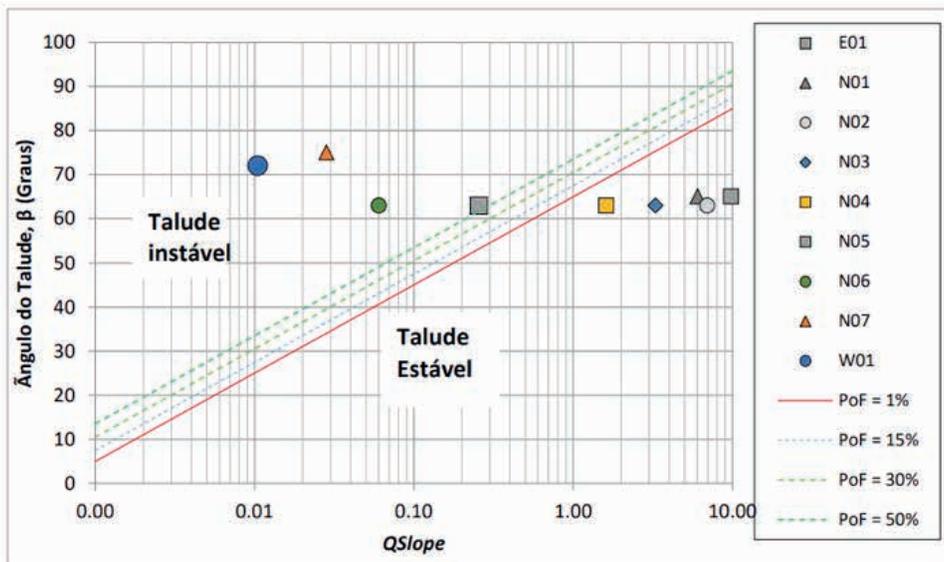
Figura 9. Resultados plotados no gráfico relacionando *Q-Slope* e o ângulo das faces do talude.

As avaliações também mostraram que as faces E01, N01, N02, N03 e N04, encontram-se estáveis de acordo com método *Q-Slope*. Esses resultados refletem coerência com as caraterísticas geotécnicas observadas em campo, pois nessas faces as rochas são competentes, isto é, apresentam alta resistência quanto a rocha intacta. As faces E01 e N01 apresentam rochas pouco alteradas, as descontinuidades são fechadas e sem preenchimento ou quando ocorre são arenosos, todavia observa-se nas faces N02, N03 e N04 blocos soltos e de menores tamanhos, esse aspecto reflete as condições físicas do talude, classificada no parâmetro SRFa.

A partir da análise cinemática de estabilidade dos taludes que foi aplicada nas faces onde a rocha é competente, foi identificado possível ruptura planar nas faces E01, N01, N02 e N03 e em cunha nas demais. No caso de ruptura em cunha, é possível observar que ocorrem situações passíveis de ruptura devido à verticalidade constante do *Dip* das descontinuidades com altos valores de ângulo, próximos a 80°, e variação constante no *Dip Direction*.

Figura 10. Comparativo de tamanhos de blocos entre as faces E01 e W01.

Em relação ao *Jn*, todo o talude apresenta mais que uma família de juntas, desta forma foi aplicada o fator O que representa a criticidade aplicada por cada família, variando em cinco classes de muito favorável até as situações que podem ocorrer falhas pontuais, entretanto nas faces N05, N06 e W01 o alto grau de alteração das rochas impossibilita o reconhecimento das famílias, essa situação foi considerada na classificação *Jn* e que corroborou para os resultados desses taludes apresentarem resultados tão abaixo da média.

Esses taludes foram escavados na rocha a partir do desmonte mecânico e com uso de explosivos, o que resultou no acúmulo de blocos soltos e descontinuidades aleatórias na face do talude que, em constante exposição às intempéries, vão alterando-se e se desprendendo do talude. A perturbação relacionada ao desmonte teve maior influência no parâmetro *SRFslope*.
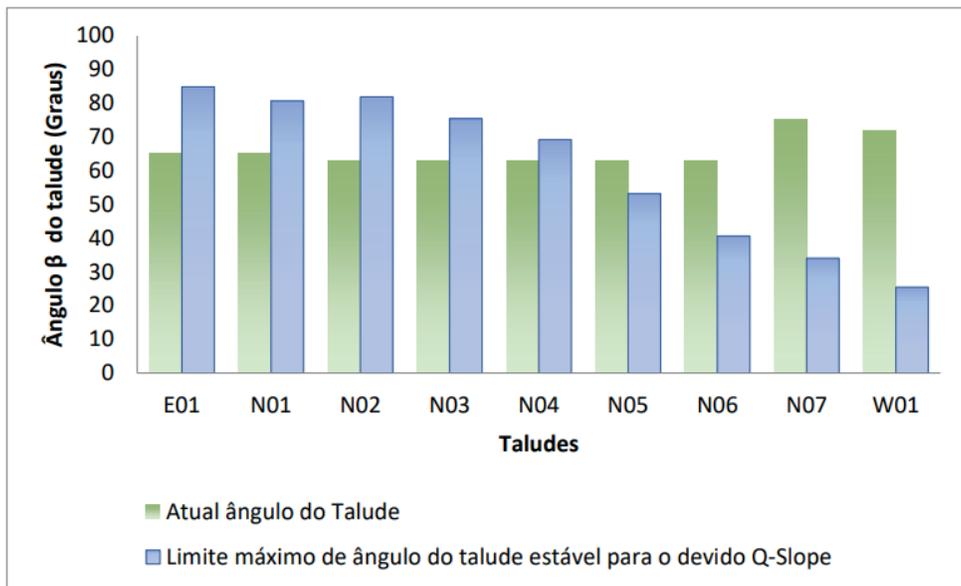
Figura 11. Comparativo entre os ângulos das faces na avaliação e o recomendado pelo método.

Após calcular o *Q-Slope* para cada face do talude, foi possível, a partir da (Equação 4) verificar ângulos os quais as faces com baixo valor de *Q-Slope*, tornam-se estáveis segundo o método. Desta forma, as faces N05, N06 N07 e W01 precisariam de um retaludamento para os ângulos de 53º, 40º, 34º e 25º, respectivamente (Figura 11). Esses resultados mostraram-se incoerentes com a realidade aplicável ao que se referem principalmente as faces N07 e W01 que apesar da baixa resistência da rocha e outros fatores, os ângulos sugeridos pelo método são ângulos extremamente baixos, considerando taludes rochosos ou até mesmo saprólitos.

6 I CONCLUSÕES

O método mostrou-se uma ferramenta prática e eficiente para definição de ângulos de face para maciços rochosos pouco alterados e homogêneos, mostrando resultados aplicáveis na prática. Para determinações em casos mais complexos, como em taludes compostos por saprólitos, o resultado foi muito conservador, considerando os ângulos recomendáveis aos taludes e aplicabilidade desses ângulos. Isto é evidenciada principalmente na face W01 onde o ângulo indicado de 25º é inferior ao ângulo de repouso de materiais inconsolidados, como taludes em solos arenosos.

Desta forma sugere-se que nos casos mais complexos, envolvendo baixos valores de *Q-Slope* o método deva ser usado com cautela e se possível em conjunto de outros métodos de análise, para a descrição detalhada e uma avaliação mais condizente com a realidade do problema.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F. M.; HASUI, Y. (1984). ***O Pré-Cambriano do Brasil**,* São Paulo, 374 p.

BAR, N.; BARTON, NICK. (2017). **The Q-Slope Method for Rock Slope Engineering**. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 50. 3307-3322.

BARTON N.; BAR N. (2015). **Introducing the Q-slope method and its intended use within civil and mining engineering projects**. In: Schubert W, Kluckner A Future development of rock mechanics; *Proceedings of the ISRM regional symposium*, *Eurock 2015 and 64th geomechanics colloquium*, Salzburg, 162 p.

BARTON, N.; LIEN, R.; LUNDE, J. (1974). **Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support**. *Rock Mechanics.* Vol 6, pp. 189-236.

BIENIAWSKI, Z. T. (1989) ***Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil and Petroleum Engineering***. Wiley, New York.

BORSATTO, S. et al. (2012). **Mapeamento Geológico da Área Urbana de Caxias do Sul**. *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental*, p. 83–92.

BORSATTO, S. (2011). ***Contribuição ao estudo geológico-geotécnico da área urbana de Caxias do Sul - RS***. 97 f. TCC (Graduação) - Curso de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BRADY B. H. G.; BROWN E. T. (1999). **Rock mass structure.** *Rock Mechanics*. Springer, Dordrecht. PP. 46- 84.

BRESSANI, L. A.; FLORES, J. A. A.; NUNES, L. F., (2005). ***Desenvolvimento de Estudos de Engenharia Geotécnica / Geologia com Vistas à Geração de Relatório e Mapa Geotécnico dos Solos e Rochas Superficiais da Área Urbana da Cidade de Caxias do Sul.*** Caxias do Sul, Brasil: Contrato No 2615.000386 - 97/2004. Programa Habitar Brasil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

CAXIAS DO SUL, (2021). ***Portal GeoCaxias – Mapa público***, disponível em https://geopublico.caxias.rs.gov.br/geocaxias. Acesso em: 19 set.2021.

CEMADEM, (2021). **Munícipios monitorados**, disponível em: http://www2.cemaden.gov.br/municipios-monitorados-2/. Acesso em: 19 set.2021.

DEERE, D.; MILLER, R. (1966). ***Engineering classification and index properties for intact rock.*** 1º. New Mexico: University of Illinois, p. 65- 116.

DEERE, D. U.; PATTON F.D. (1971). **Slope stability in residual soils***. Proc 4th. Panamerican Conference on Doil Mechanics and Foundation Engineering*. San Juan, vol. 1. Pg.98-170.

DEERE, D. U. (1964). **Technical description of rock cores for engineering purposes***. Rock Mechanics and Rock Engineering,* Vol. 1, No. 1, p. 16-22.

FIORI, A. P.; GARMIGNANI, L. (2016). ***Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes.*** São Paulo: oficina de Textos.

ISRM. (INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS). (1981). ***Rock Characterization, Testing and Monitoring - ISRM Suggested Methods****.* Londres: Pergamon Press.

PRIEST, S. D.; HUDSON, J. A. (1976). **Discontinuity spacings in rock.** *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences; Geomechanics*, 13, p. 135–148.

RENNE, P. R., DECKART, K., ERNESTO, M., FERRAUD, G., PICCIRILLO, E. M., (1996). **Age of the Ponta Grossa Dike Swarm (Brazil) And implications to Parana flood volcanism*.*** *Earth and Planetary Science Leters*. p. 199 – 212.

TERRASERVICE, (2020). **Levantamento topográfico**, TERRASERVICE - Engenharia e geologia LTDA. Arquivo DXF, Caxias do sul.

VALLEJO, L. I. G. et al., (2002). ***Geological Engineering***. Madri, Espanha: Pearson Educación.

ZALÁN, P. V. et al. (1987). **Tectônica e sedimentação da Bacia do Paraná.** *Atas do III Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia*. Curitiba, v. 1.

IDENTIFICAÇÃO DE FAMÍLIAS DE DESCONTINUIDADES NO SOFTWARE CLOUDCOMPARE - ESTUDO DE CASO EM MINERAÇÃO SUBTERRÂNEA

Data de submissão: 09/05/2023 *Data de aceite: 02/06/2023*

Diogo Peixoto Cordova
Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA
Caçapava do Sul – RS
http://lattes.cnpq.br/2354744565105719

RESUMO: Considerando a recente popularização de equipamentos com tecnologia LiDAR embarcada, levantamentos 3D têm sido realizados em uma velocidade muito maior do que utilizando-se de métodos tradicionais, principalmente em ambientes subterrâneos. Os dados obtidos possuem alta densidade de informações, gerando nuvens de pontos que permitem o reconhecimento dos padrões estruturais existentes em um dado domínio geotécnico. Isto torna-se uma ferramenta que auxilia os geólogos e engenheiros geotécnicos a identificarem rapidamente e em maior número, dados estruturais para análise de estabilidade ou monitoramento de processos de instabilidade. Porém, justamente em virtude da grande quantidade de dados, métodos manuais para identificação e classificação dos planos de descontinuidade na nuvem de pontos tornam-se inviáveis de serem empregados. Desta forma, a partir do software livre CloudCompare e seu plugin Facets é possível realizar a extração semiautomática de estruturas planares expostas nas paredes e tetos das galerias subterrâneas escavadas. O objetivo principal deste trabalho é a definição ótima dos parâmetros de busca a serem utilizados, além do correto agrupamentos e filtragem dos dados obtidos pelo algoritmo matemático, de forma que o resultado seja somente as estruturas reconhecidamente relevantes do ponto de vista geotécnico (famílias de descontinuidades críticas). Os produtos obtidos são arquivos tridimensionais em formato .SHP (shapefile) contendo os polígonos das famílias críticas georreferenciadas e planilhas csv com atributos e orientação dos planos, de forma que possam ser utilizados em análises cinemáticas de estabilidade, riscos de queda de blocos e monitoramento de setores da mina. Um estudo de caso de exemplo é demonstrado, onde famílias principais de descontinuidades já conhecidas foram utilizadas para filtragem de planos a partir de levantamentos realizados. Com a metodologia demonstrada foi possível o reconhecimento destas mesmas famílias ao longo de todas as galerias subterrâneas

levantadas.
PALAVRAS-CHAVE: Planos estruturais, SLAM, LiDAR, CloudCompare

IDENTIFYING DISCONTINUITY SETS USING CLOUDCOMPARE SOFTWARE – UNDERGROUND MINING CASE STUDY

ABSTRACT: Considering the recent popularization of equipment with embedded LiDAR technology, 3D surveys have been carried out at a much higher speed than using traditional methods, mainly in underground environments. The data obtained have a high density of information, generating clouds of points that allow the recognition of existing structural patterns in each geotechnical domain. This becomes a tool that helps geologists and geotechnical engineers to identify quickly and in greater numbers, structural data for stability analysis or monitoring of instability processes. However, precisely because of the large amount of data, manual methods for identifying and classifying the discontinuity planes in the point cloud become impracticable to be used. In this way, using the open software CloudCompare and its Facets plugin, it is possible to perform the semi-automatic extraction of planar structures exposed on the walls and roof of excavated underground galleries. The main objective of this work is the optimal definition of the search parameters to be used, in addition to the correct grouping and filtering of the data obtained by the mathematical algorithm, so that the result is only the structures recognized as relevant from the geotechnical point of view (sets of discontinuities). The products obtained are three-dimensional files in .SHP format (shapefile) containing the polygons of the georeferenced critical sets and csv spreadsheets with attributes and orientation of the planes, so that they can be used in kinematic analysis of stability, risks of falling blocks and monitoring of mine sectors. An example case study is demonstrated, where main sets of discontinuities were used to filter plans from surveys carried out. With the demonstrated methodology, it was possible to recognize these same sets throughout all the underground galleries surveyed.
KEYWORDS: Discontinuities, SLAM, LiDAR, CloudCompare

1 I INTRODUÇÃO

Considerando a recente popularização de equipamentos com tecnologia LiDAR embarcada, levantamentos tridimensionais têm sido realizados em uma velocidade muito maior do que utilizando-se de métodos tradicionais, principalmente em ambientes subterrâneos. Além disso, os dados obtidos possuem alta densidade de informações, gerando nuvens de pontos que permitem o reconhecimento dos padrões estruturais existentes em um dado domínio geotécnico. Porém, justamente em virtude da grande quantidade de dados e altas densidades amostrais, métodos manuais de classificação tornam-se inviáveis de serem empregados.

Desta forma, a partir de métodos numéricos é possível realizar a extração semiautomática de estruturas planares nos maciços rochosos que compões as galerias subterrâneas escavadas, como paredes e tetos.

Os produtos obtidos são arquivos tridimensionais contendo os polígonos das famílias

críticas georreferenciadas, de forma que possam ser utilizados em análises cinemáticas de estabilidade, riscos de queda de blocos e monitoramento de setores da mina.

1.1 Objetivos

O presente trabalho possui como objetivo principal a definição ótima dos parâmetros matemáticos de busca a serem utilizados, além do correto agrupamentos e filtragem dos dados obtidos pelo algoritmo matemático, para que somente as estruturas reconhecidamente relevantes do ponto de vista geotécnico (famílias de descontinuidades críticas) sejam reconhecidas.

2 | ESTADO DA ARTE

2.1 Revisão de tecnologias antigas para levantamento 3D

Os métodos para levantamento de escavações subterrâneas, antes da implementação das tecnologias atuais, eram realizados pelo sistema Cavity Monitoring System (CMS) e Cavity Auto-scanning Laser System (C-ALS). A figura 1 demonstra um sistema do tipo CMS. Ambos os sistemas até então eram tidos como padrão global da indústria para levantamento de escavações por vários anos.

Figura 1 – Componentes do equipamento CMS. Fonte: OPTECH, 2012.

A utilização dessa tecnologia possui algumas restrições operacionais como a necessidade de instalação fixa do equipamento, que pode ser um risco físico de exposição tanto do pessoal quando do equipamento em áreas de instabilidade. Também devido o caráter fixo do equipamento, pode ocorrer zonas de “sombreamento” nos levantamentos, devido à geometria ou ondulações nas paredes e teto das galerias.

O elevado tempo necessário para cada levantamento também pode ser uma restrição, uma vez que necessita de coordenação e paralização das atividades de produção

da mina.

2.2 Revisão de tecnologias recentes para levantamento 3D

O processo de mapeamento estrutural em ambientes subterrâneos tem sido limitado a sondagens, geofísica ou técnicas de mapeamento de face ou de janela. Mais recentemente, o uso de LiDAR mostrou-se promissor para capturar digitalmente informações estruturais em túneis ou galerias de mina.

A tecnologia SLAM *(Simultaneous Localization and Mapping)* pode ser definida como o processo de mapear uma área enquanto o dispositivo vai se localizando dentro dessa área em tempo real. Isso é o que torna possível o mapeamento móvel. Isso permite a construção de mapas de grandes áreas em espaços de tempo muito mais curtos, pois as áreas podem ser medidas usando robôs, veículos, RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System)* ou dispositivos de mão como *smartphones*. Os sistemas SLAM simplificam a coleta de dados e podem ser usados em ambientes externos ou internos (GeoSLAM, 2023).

A integração dos levantamentos realizados com RPAS que possuem sistemas SLAM e sensor LiDAR de alta resolução embarcado (figura 2), em fluxos de trabalho de modelagem geotécnica, oferece uma melhora do processo e se tornará uma ferramenta chave na jornada contínua em busca de informações realistas envolvendo mapeamento estrutural, principalmente em locais não seguros.

Figura 2 – RPAS modelo Elios 3 com sistema SLAM embarcado. Fonte: FLYABILITY, 2023.

A estimativa da persistência das descontinuidades permanece dada a observação limitada dessas estruturas nessas técnicas apresentadas. Em minas subterrâneas com grande extensão de galerias de desenvolvimento, maior é a quantidade de faces rochosas expostas disponíveis para mapeamento. Dessa forma, essas grandes disponibilidades de dados forneceriam uma maior compreensão da persistência e da interação entre descontinuidades em escalas de comprimento maiores.

O uso de LiDAR permite aumentar a confiança na reconciliação dos modelos estruturais em escala de mina, que a equipe de geologia fornecerá a equipe de geotécnicos

para avaliação de estabilidade.

2.3 Software *cloudcompare*

CloudCompare é um software multiplataforma para processamento de nuvem de pontos 3D. Ele também pode lidar com malhas triangulares e imagens calibradas. Foi originalmente desenvolvido pela colaboração entre a Telecom ParisTech e a divisão de P&D da EDF. O projeto iniciou em 2003 como desenvolvimento da tese de doutorado de Daniel Girardeau-Montaut em detecção de mudança em dados geométricos 3D (Girardeau-Montaut *et al.*, 2005).

Seu principal objetivo era detectar rapidamente mudanças em nuvens de pontos 3D de alta densidade adquiridas com scanners a laser em instalações industriais ou canteiros de obras. Posteriormente, evoluiu para um software de processamento de dados 3D mais geral e avançado. Agora é um projeto independente de código aberto e livre (CloudCompare, 2023).

O software fornece um conjunto de ferramentas básicas para edição manual e renderização de nuvens de pontos 3D e malhas triangulares. Também oferece vários algoritmos avançados de processamento, entre os quais métodos para realizar: projeções, cálculo de distância, cálculo estatístico, segmentação, estimativa de características geométricas (densidade, curvatura, rugosidade, orientação do plano geológico etc.).

Para aplicações em geologia estrutural, os plugins *Compass* e *Facets* têm sido amplamente utilizados para extração de planos de descontinuidades ou mesmo lineamentos (traços) estruturais como utilizado em Bitencourt (2021).

2.3.1 Plugin Facets

A abordagem geral do FACETS consiste em dividir uma nuvem de pontos em grupos de pontos adjacentes que compartilham algum grau de coplanaridade definido pelo usuário. A resposta não é única, pois há uma infinidade de maneiras de dividir o espaço em porções planas. O FACETS possui dois algoritmos distintos para dividir o espaço inicial: uma árvore com k dimensões (*kd-tree*) ou um método de análise rápida (*fast marching*). Para ambos os métodos, o FACETS implementa um algoritmo de ajuste de mínimos quadrados (Dewez *et al.*, 2016)

Uma vez que o espaço foi dividido recursivamente, as subdivisões elementares são novamente agrupadas de acordo com um critério de coplanaridade. É frequente em geologia o caso em que um único plano de descontinuidade pode aflorar em diferentes locais, às vezes exposto, às vezes entrando de volta no maciço rochoso, mas ainda sim constituindo o mesmo plano de descontinuidade.

3 | METODOLOGIA

O software utilizado para a busca e agrupamento dos planos principais (famílias de descontinuidades críticas) a partir das nuvens de pontos, será o *CloudCompare* e o plugin incorporado *Facets*.

O processo para reconhecimento dos planos de descontinuidade possui várias etapas, sendo estas definidas em seis desde a preparação das nuvens de pontos até a exportação do produto. As etapas são definidas nesta ordem:

1) Sub-amostragem da nuvem de pontos
2) Definição dos parâmetros para extração automática de faces
3) Extração automática de faces
4) Agrupamento de famílias
5) Seleção de famílias principais
6) Filtragem de planos
7) Exportação dos arquivos

4 | ESTUDO DE CASO

O estudo de caso utilizado constitui-se de 12 levantamentos de galerias subterrâneas, obtidos pela tecnologia SLAM em dispositivo de mão. O conjunto de dados totalizam cerca de 35 Gb em nuvem de pontos em formato de arquivo LAS.

O formato de LAS (LiDAR *Aerial Survey*) é um formato de arquivo binário amplamente usado, projetado para armazenar dados de nuvens de pontos 3D coletados por sistemas de levantamento LiDAR. Foi desenvolvido pela Sociedade Americana de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (ASPRS) em 2003 e é considerado o padrão da indústria (ASPRS, 2023).

Os arquivos LAS contêm uma coleção de pontos cada um com um conjunto de atributos como coordenadas X, Y e Z, valores de intensidade, números de retorno e códigos de classificação. O formato foi projetado para ser flexível, permitindo ao usuário escolher quais atributos serão incluídos no arquivo, dependendo de seus requisitos específicos.

5 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Regularização da nuvem de pontos

Esta etapa de regularização, também chamada de sub-amostragem, da nuvem de pontos é importante e necessária para que as etapas subsequentes de reconhecimento de planos possam ser realizadas. No software *CloudCompare* isso se dá através da ferramenta *cloud sub sampling*.

O objetivo da ferramenta é normalizar os dados para o mesmo suporte amostral. Com isso, evita-se a ocorrência de maior densidade de pontos em um local específico, o que poderia levar a uma tendência (viés) no momento do reconhecimento dos planos de descontinuidade.

Um dos métodos mais utilizados para a sub-amostragem é o critério de distância mínima entre pontos. Para o estudo de caso se julgou o valor de 0,05 m como sendo suficiente (Figura 3).
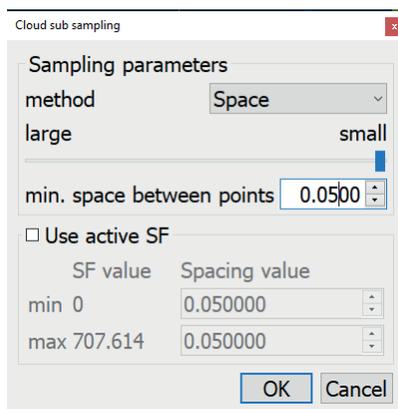
Figura 3 – Janela do software, mostrando os critérios definidos para a sub-amostragem da nuvem de pontos.

As figuras 4 e 5 demonstram, em uma vista superior de um trecho de galeria subterrânea, a diferença entre a nuvem de pontos antes e depois da regularização de pontos.
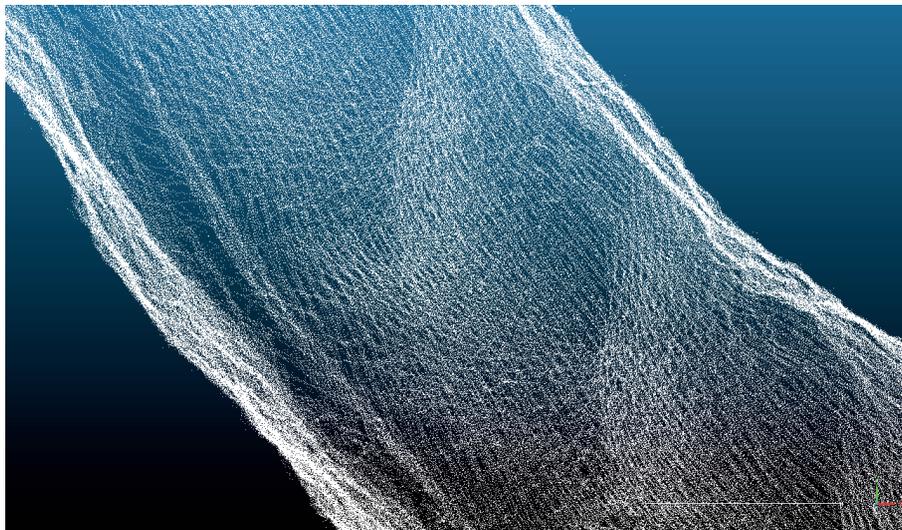
Figura 4 – Vista superior de um trecho de galeria subterrânea antes da regularização de pontos.
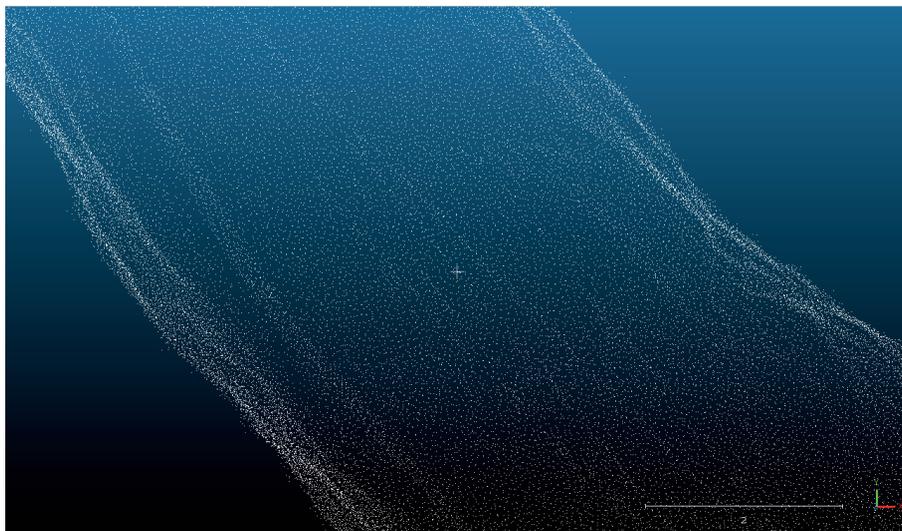
Figura 5 - Vista superior de um trecho de galeria subterrânea após a regularização de pontos.

5.2 Reconhecimento automático de planos de descontinuidades

Para extração automática dos planos de descontinuidades foi utilizado o plugin *Facets*, com o método *kd-tree*, acessado através do menu: “*Cell fusion kd-tree”*. Foram testados alguns parâmetros distintos, sendo obtido o melhor resultado em termos de baixo número de falsos positivos e falsos negativos, conforme parâmetros da Tabela 1.

Parâmetros do método *kd-tree*	
Parâmetro de fusão de células	
Ângulo máximo entre células	5 graus
Distância máxima relativa	1 unidade
Parâmetros de faces	
Distância máxima entre pontos p/ agrupamento	0,2
Número mínimo de pontos por face	70
Comprimento máximo de face	0,5

Tabela 1 – Parâmetros utilizados para execução do método *kd-tree* de reconhecimento de planos.

A figura 6 a seguir mostra a janela do software com os parâmetros inseridos para a extração automática de planos realizada.
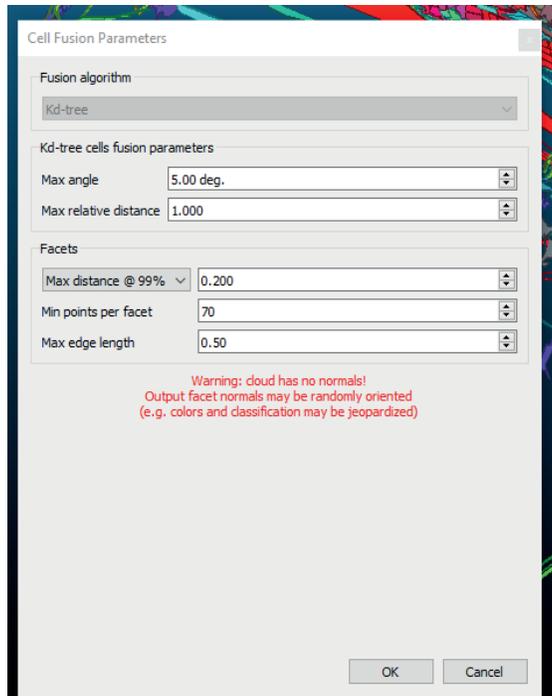
Figura 6 – Vista superior de um trecho de galeria subterrânea após a extração automática de planos de descontinuidades.

A figura 7 a seguir mostra o resultado da extração automática de planos realizada.
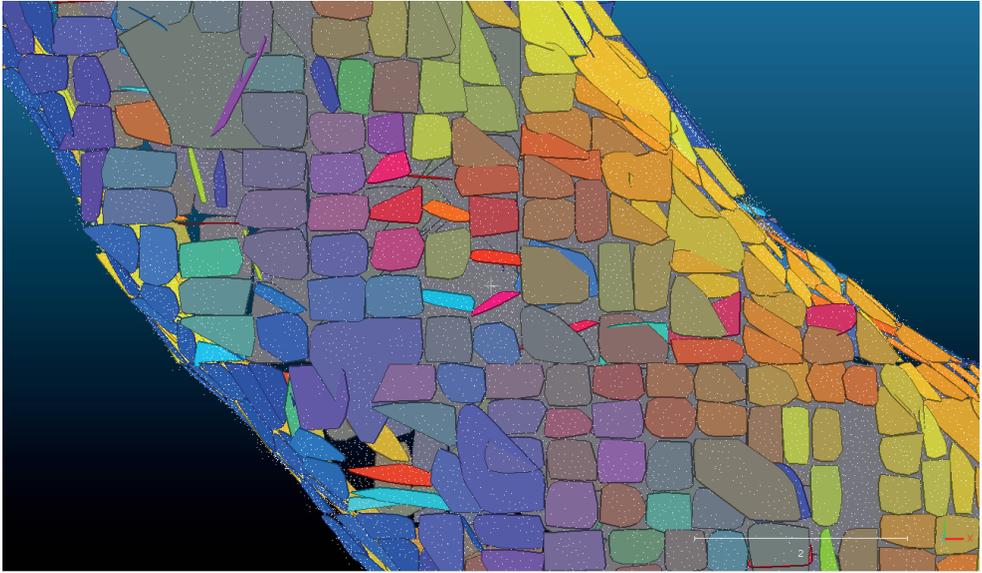
Figura 7 – Vista superior de um trecho de galeria subterrânea após a extração automática de planos de descontinuidades.

5.3 Classificação dos planos de descontinuidade em famílias principais

Nesta etapa os planos de descontinuidades obtidos são classificados e agrupados segundo sua variação de orientação e distância relativa, na notação: *Dip*/*Dip Direction* (mergulho/direção de mergulho). Essa etapa é importante para que as famílias principais desejadas possam ser facilmente selecionadas e filtradas posteriormente.

No software *CloudCompare* a ferramenta utilizada nesta etapa é chamada de *Classify facets by Orientation*. Os parâmetros definidos nesta etapa foram o intervalo angular de 10 graus e a distância máxima entre planos, definida em uma unidade. Considerando as famílias principais definidas previamente, foi possível filtrá-las dentre todos as classificações produzidas. A figura 8 a seguir mostra o resultado da filtragem das famílias principais em um trecho de galeria subterrânea.
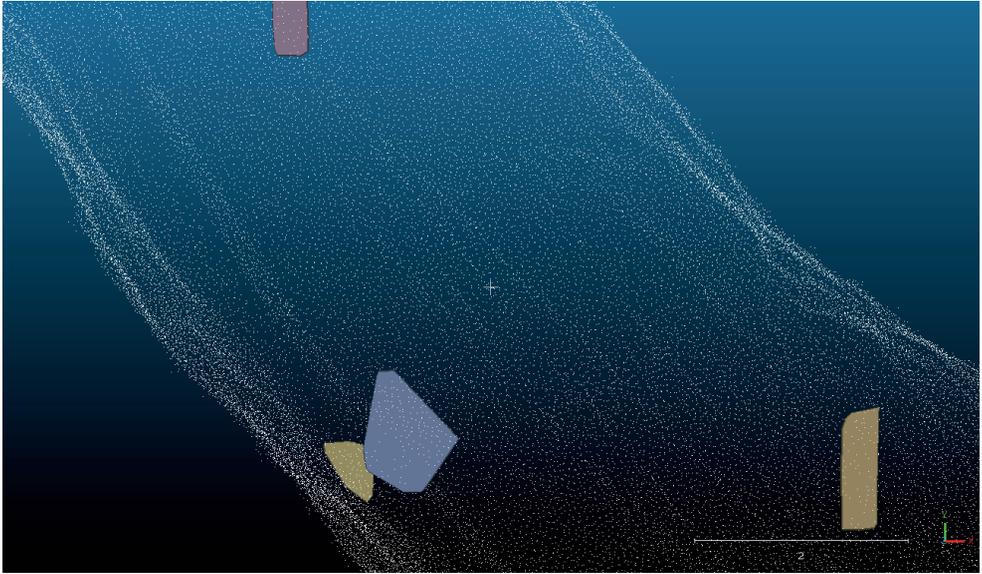
Figura 8 – Vista superior de um trecho de galeria subterrânea após filtrar somente as famílias principais de descontinuidades.

5.4 Etapa de filtragem de planos

Nesta etapa os planos serão filtrados de três formas. Primeiramente são desconsiderados todos os planos com área de superfície maior do que $4m^2$ e menor do que $0,2m^2$.

Essa filtragem é importante para retirar planos muito pequenos, sem representatividade real, e planos muito grandes, formados pela projeção de planos em dutos de ventilação ou canos de ar/drenagem/água no teto da galeria, conforme demonstra a figura 9 a seguir.
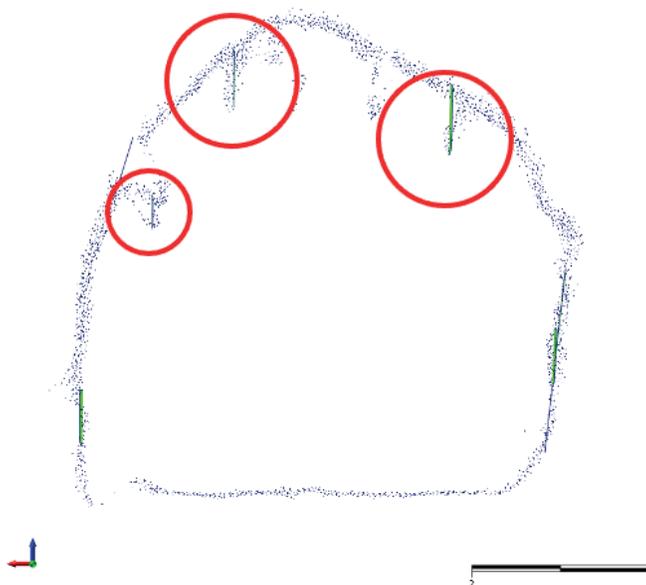
Figura 9 – Seção de galeria subterrânea mostrando planos identificados que na verdade representam cabos, dutos, tubulações etc.

Outro método de filtragem de planos realizado foi através do comprimento da maior aresta do polígono. Foram desconsiderados os planos com arestas maiores do que 3m, que correspondiam a planos com projeção extrapolada entre galerias próximas.

Por fim, foram filtrados planos com erro RMS *(Retro-projection Mean Square Error)* acima de 0,1. Este filtro é capaz de filtrar planos gerados com pontos muito irregulares. Como última etapa de filtragem, planos foram removidos manualmente, quando identificados como falsos positivos.

5.5 Exportação dos resultados

Os resultados obtidos, ou seja, planos de descontinuidades filtrados dentro das famílias principais previamente conhecidas foram exportados do *CloudCompare* em formato *ShapeFile* (SHP) e em formato *Comma-separated values* (CSV). Para o CSV os atributos exportados foram os seguintes: *CenterY; CenterZ; NormalX; NormalY; NormalZ; RMS; Horiz_ext; Vert_ext; Surf_ext; Surface; Dip dir.; Dip; Family ind.; Subfamily ind*. Os polígonos classificados em famílias, podem ser visualizados na figura 10 a seguir.
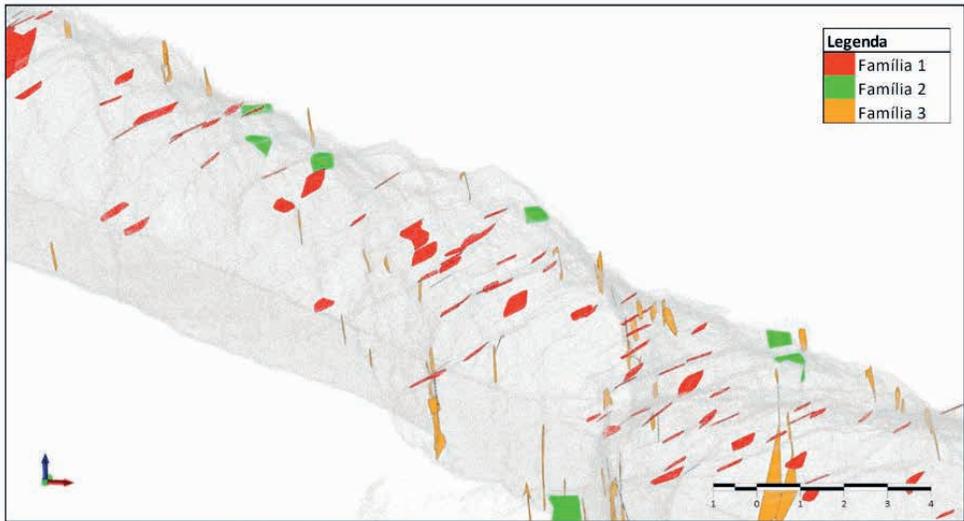
Figura 10 – Vista isométrica de trecho de galeria subterrânea mostrando os planos identificados correspondendo as famílias críticas principais definidas previamente

6 | CONCLUSÕES

O uso de novas tecnologias aplicadas na mineração subterrânea invariavelmente encontra restrições e dificuldades iniciais antes da sua plena utilização. No entanto, uma vez superadas essas dificuldades, os benefícios operacionais oferecem novas oportunidades para as operações obterem ganhos significativos.

A tecnologia LiDAR mencionada não foi apenas responsável por melhorias em um processo já existente, a tecnologia na verdade permitiu que dados fossem obtidos de fontes que antes eram inviáveis, inseguras ou impraticáveis.

O método empregado para a extração, classificação e filtragem de planos, mostrou-se bastante eficiente para tratar a grande quantidade de dados provenientes de nuvem de pontos. Em termos quantitativos foi possível processar cerca de 35Gb de dados de forma rápida, sendo classificados ao todo cerca de 570 mil planos de descontinuidades dentre as famílias de descontinuidades já conhecidas.

Os dados obtidos poderão agora ser facilmente manipulados para realização de uma análise cinemática quanto a formação de blocos no teto ou paredes de galerias ou intersecções, definição de zonas de risco de deslizamento ou quedas e ainda quanto a necessidade de reforço adicional (suporte secundário) nas escavações.

Importante salientar que esta metodologia deve ser utilizada somente em conjunto das metodologias de mapeamento de campo tradicionais, tais como *scanline*, escaneamento de janela, descrição de testemunhos de sondagem etc. Pois os parâmetros de resistência das famílias de descontinuidades ainda requerem descrições e ensaios de

campo ou mesmo coletada de amostras para ensaios em laboratório.

REFERÊNCIAS

ASPRS (2023). Laser (LAS) file format exchange activities. Disponível em: https://www.asprs.org/divisions-committees/lidar-division/laser-las-file-format-exchange-activities. Acesso em: 10 abril 2023.

Bitencourt, G.A. (2021). **Extração automática de descontinuidades e análise de estabilidade de taludes em uma mina de calcário no município de Caçapava do Sul – RS**. Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, TCC (Graduação) - Curso de Geologia. 61 p.

CloudCompare (2023). **Introduction: History.** Disponível em:https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/Introduction. Acesso em: 10 abr. 2023.

Dewez, T.J.B., Girardeau-Montaut, D., Allanic, C., Rohmer, J. (2016). FACETS: a CloudCompare plugin to extract geological planes from unstructured 3D point clouds. **The International Archives of The Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v.5, p. 799-804.

FLYABILITY (2023). **Elios 3: Digitizing the inaccessible**. Disponível em: https://www.flyability.com/elios-3. Acesso em: 10 abr. 2023.

GeoSLAM (2023). **What is SLAM?.** Disponível em: https://geoslam.com/what-is-slam/. Acesso em: 10 abr. 2023.

Girardeau-Montaut, D., Roux M., Marc R., Thibault G. (2005). Change Detection on Points Cloud Data acquired with a Ground Laser Scanner. **ISPRS Workshop Laser Scanning**. Enschede, Holanda, 6 p.

OPTECH (2012). **Operation Manual: Cavity Monitoring System (CMS).** Ontario: OPTECH SYSTEMS CORPORATION.

CAPÍTULO 5

UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO PARA MONITORAMENTO E FISCALIZAÇÃO DO CRÉDITO RURAL NAS COOPERATIVAS DE CRÉDITO

Data de aceite: 02/06/2023

Leonardo José Alves da Costa
Sorriso – Mato Grosso

Tomaz Alves da Costa
Sorriso – Mato Grosso

Margareth Aparecida Barbosa Ribeiro
Sorriso – Mato Grosso

RESUMO: O Mato Grosso é conhecido internacionalmente como um estado com grande aptidão agrícola, sendo o maior produtor mundial de soja. O crédito rural figura como um importante agente de incentivo à produção, conforme plano safra 2021/2022 com disponibilidade de crédito de R$ 251,22 bilhões. Diante desse cenário, as cooperativas de crédito devem monitorar e fiscalizar suas operações de acordo com o Manual de Crédito Rural elaborado pelo Banco Central. A utilização de técnicas de sensoriamento remoto permite a realização desse monitoramento. Foram escolhidas 4 propriedades distintas com cultivos de soja, milho, algodão e feijão. Foram obtidas imagens para formação de série temporal do sensor óptico Sentinel-2 e sensor radar Sentinel-1. Foi utilizado o índice de EVI para verificação de biomassa e desenvolvimento da cultura. Foi possível concluir que as cooperativas podem utilizar técnicas de sensoriamento remoto para monitorar e fiscalizar o crédito rural.

PALAVRAS-CHAVE: Crédito Rural, EVI, Sensoriamento Remoto, Sentinel.

ABSTRACT: Mato Grosso is known internationally as a state with great agricultural aptitude, being the world's largest producer of soybeans. Rural credit is an important agent to encourage production, according to the 2021/2022 crop plan with credit availability of R$ 251.22 billion. In view of this scenario, credit unions should monitor and supervise their operations in accordance with the Rural Credit Manual prepared by the Central Bank. The use of remote sensing techniques allows this monitoring to be performed. Four distinct properties were chosen with soybean, corn, cotton and bean crops.Images were obtained for time series formation of the Sentinel-2 optical sensor and Sentinel-1 radar sensor. The EVI index was used to verify biomass and crop development. It was possible to conclude that cooperatives can use remote sensing techniques to monitor and monitor rural credit.

KEYWORDS: Rural Credit, EVI,

Surveillance, Remote Sensing, Sentinel.

1 | INTRODUÇÃO

O estado do Mato Grosso tem na agropecuária um importante agente econômico, sendo participante fundamental no PIB (Produto Interno Bruto) nacional como notório produtor e exportador de commodities. A atividade agrícola possui diversos riscos e incertezas inerentes da atividade que podem afetar o seu desempenho, como fatores climáticos, preço, políticas públicas entre outros.

O crédito rural é destinado ao financiamento de atividades agropecuárias, custeando o ciclo produtivo, além da realização de investimentos e comercialização da produção, sendo classificado como: custeio agrícola e pecuário, investimento e comercialização. O governo brasileiro possui um papel fundamental pois anualmente direciona recursos para desenvolvimento da atividade agrícola por meio do chamado “plano safra”.

Uma parte dos produtores rurais brasileiros necessitam do crédito rural para desenvolvimento de suas atividades, pois a agropecuária possui alto custo de produção e uma fatia relevante dos produtores não possuem capital próprio para desenvolver a atividade econômica.

O crédito rural é regulado pela Banco Central e disponibilizado por instituições financeiras, dentre elas as cooperativas de crédito. De acordo com o manual de crédito rural, cabe as instituições financeiras fiscalizar suas operações de crédito com o intuito de identificar a correta aplicação do recurso.

O Banco Central do Brasil criou a Resolução nº 4.427/2015 que autoriza as cooperativas de crédito a utilizarem sensoriamento remoto para fiscalização das operações de crédito de custeio agrícola.

O objetivo deste artigo é discutir o crédito rural e avaliar a possibilidade de utilização de técnicas de sensoriamento remoto para monitoramento e fiscalização, bem como seus impactos e benefícios gerados para as cooperativas de crédito.

2 | MATERIAL E MÉTODOS

Inicialmente, foram escolhidas 4 propriedades rurais distintas para serem analisadas, estando essas áreas localizadas nos municípios de Sorriso, Vera e Nova Ubiratã, todas presentes no estado do Mato Grosso.

Após definido as áreas de estudo, foram utilizadas técnicas de Processamento Digital de Imagens, e o satélite escolhido foi o Sentinel-1 para imagens de sensor radar e Sentinel-2 para imagens de sensor óptico. As imagens foram obtidas no site do Serviço Geológico dos Estados Unidos (U.S.G.S – United States of Geological Survey).

Para os dados ópticos do Sentinel-2 foram utilizadas as bandas 4 (Vermelho), 3

(Verde) e 2 (Azul) para formação de mosaico em cores verdadeiras na composição RGB (Red – Green - Blue), e aplicadas técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI), a fim de realçar o contraste das bandas, a partir da equalização do histograma em RGB. A plataforma utilizada para o PDI das imagens sentinel-2 foi o SIG QGIS versão 3.10, de utilização gratuita. Para os dados radar do Sentinel-1 foram utilizadas a combinação de bandas em formato RGB (Red-Green-Blue) contemplando as duas polarizações disponíveis VH e VV, sendo a razão R= VV, G=VH, B= VV / VH. A plataforma utilizada para o PDI das imagens sentinel-1 foi o SIG SNAP, de utilização gratuita.

Foi utilizado novamente a ferramenta QGIS, para formação do índice de EVI das imagens sentinel-2. O Enhanced Vegetation Index (EVI) foi desenvolvido em função de sua maior sensibilidade em regiões que possuem alta biomassa além de reduzir as interferências atmosféricas, quando comparada a outros índices, como o NDVI por exemplo. Sua equação é: EVI = G x (pNIR – pred / pNIR + C1 x pred – C2 x pblue + L).

O EVI tem se mostrado ser a melhor opção para a análise do pleno desenvolvimento das culturas agrícolas e também para diferenciá-las e por isso foi utilizado neste trabalho. Após esses processamentos, foi possível criar uma série temporal de imagens e assinatura espectral para observação do tipo de cultura, percentual de área plantada e a condução adequada do empreendimento.

Foi realizado vistorias presenciais nas áreas estudadas a fim de verificar a acurácia dos processamentos e resultados obtidos e validar as informações geradas por meio dessas técnicas.

3 I RESULTADOS

Com base na série temporal de imagens Sentinel-2 e Sentinel-1 e por meio da análise do gráfico de índice de EVI, foi possível acompanhar todo o ciclo das culturas analisadas (feijão, soja, milho e algodão), o percentual de área plantada e a correta aplicação de crédito. Em vistoria nas áreas, foi possível confirmar a análise realizada.

O índice de EVI para análise de biomassa e criação de assinatura espectral se mostrou eficiente, sendo possível diferenciar as culturas agrícolas por meio desse índice.

Por fim, ficou comprovado que por meio da obtenção de dados gratuitos e aplicação de técnicas de processamento de dados, as cooperativas de crédito podem realizar o monitoramento de sua carteira de crédito rural, cumprindo com as normativas vigentes, diminuindo seus custos e aumentando a sua eficiência nesse processo.

4 I DISCUSSÃO

Observando as imagens em série temporal dos dados sentinel- 2 e sentinel-1 combinados com índice de EVI, foi possível monitorar com eficácia todo o ciclo do cultivo,

diferenciar as culturas e verificar a correta aplicação do crédito.

Em função da combinação dos dados ópticos com radar, mesmo em períodos com grande incidência de nuvens, é possível manter o monitoramento, uma vez que imagens radar não sofrem interferência atmosféricas, permitindo a correta fiscalização via sensoriamento remoto em todas as etapas do cultivo.

Por meio do índice de EVI, foi possível fazer o monitoramento do desenvolvimento do cultivo, até mesmo acompanhamento do período de colheita. A análise da curva temporal de EVI é uma metodologia que atende esse requisito, permitindo a diferenciação dos padrões de curvas, identificando o tipo de cultura.

Em todas as áreas monitoradas, o resultado obtido por métodos de sensoriamento remoto, foi confirmado por vistoria in loco, demonstrando eficácia do monitoramento realizado, sendo apresentado como uma ferramenta para as cooperativas de crédito em seu processo de monitoramento e fiscalização.

5 I CONCLUSÕES

Este artigo teve como principal objetivo avaliar a possibilidade de as cooperativas de crédito e instituições financeiras utilizarem técnicas de sensoriamento remoto para o monitoramento e fiscalização do crédito rural. Diante disso, foi possível evidenciar que essas técnicas possuem um potencial satisfatório. Por meio delas, as cooperativas de crédito podem monitorar sua carteira de crédito de forma remota, aumentando sua escala de análise, com redução de custos e aumento de eficiência.

Por meio da combinação de dados gratuitos de sensores ópticos (Sentinel-2) e sensores radar (Sentinel-1), foi possível identificar a cultura plantada, seu desenvolvimento vegetativo e confirmar o tamanho da área utilizada. O índice de EVI para análise de biomassa e criação de assinatura espectral se mostrou eficiente, sendo possível diferenciar as culturas agrícolas por meio desse índice.

6 I ILUSTRAÇÕES, GRÁFICOS, FOTOGRAFIAS E TABELAS
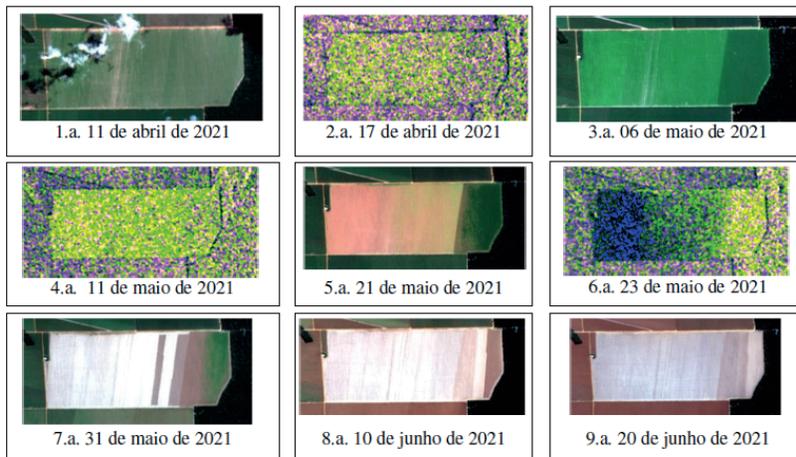
Figura 1. Área de feijão
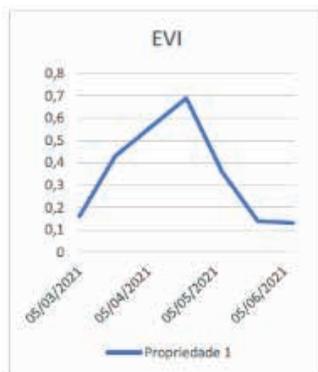
Tabela 1. Índice de EVI

Figura 2. Área de Feijão
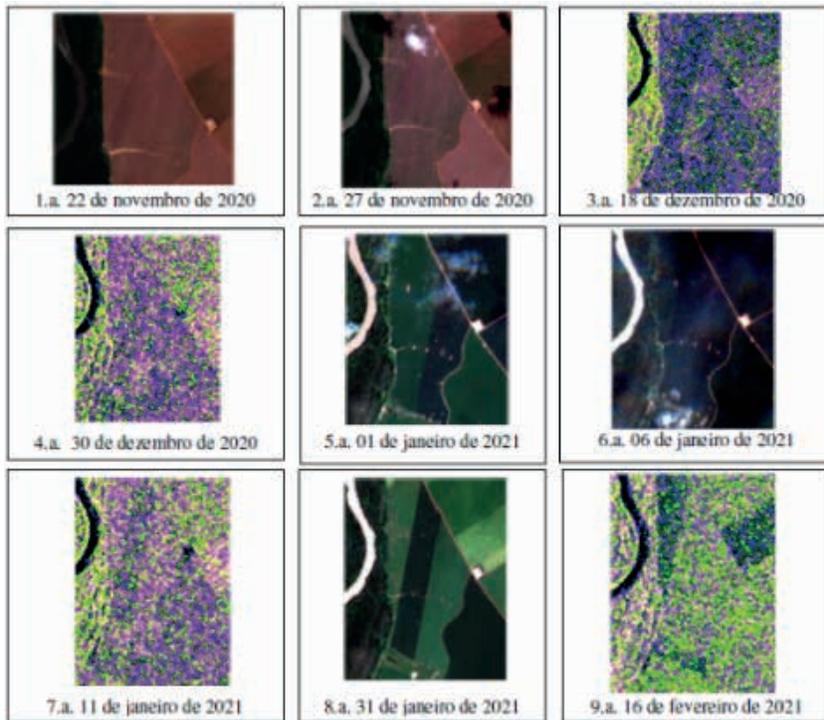
Figura 3. Área de soja
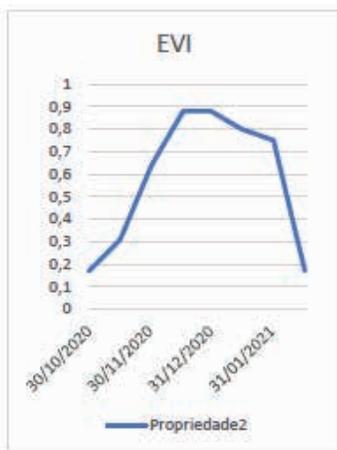
Tabela 2. Índice de EVI

Figura 4. Área de soja
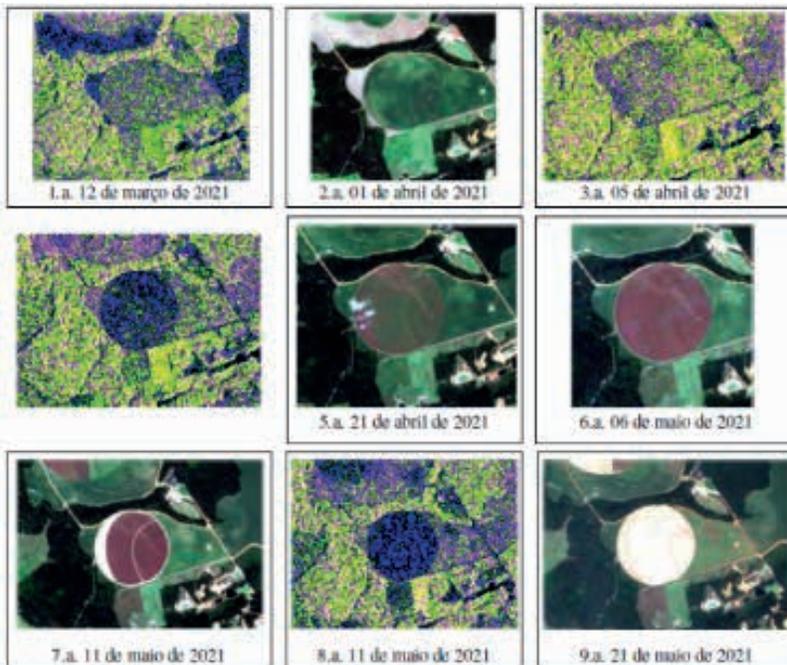
Figura 5. Área de milho
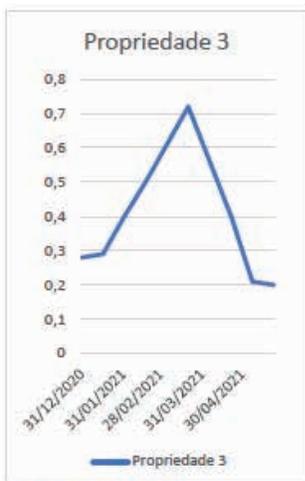
Tabela 3. Índice de EVI

Figura 6. Área de milho
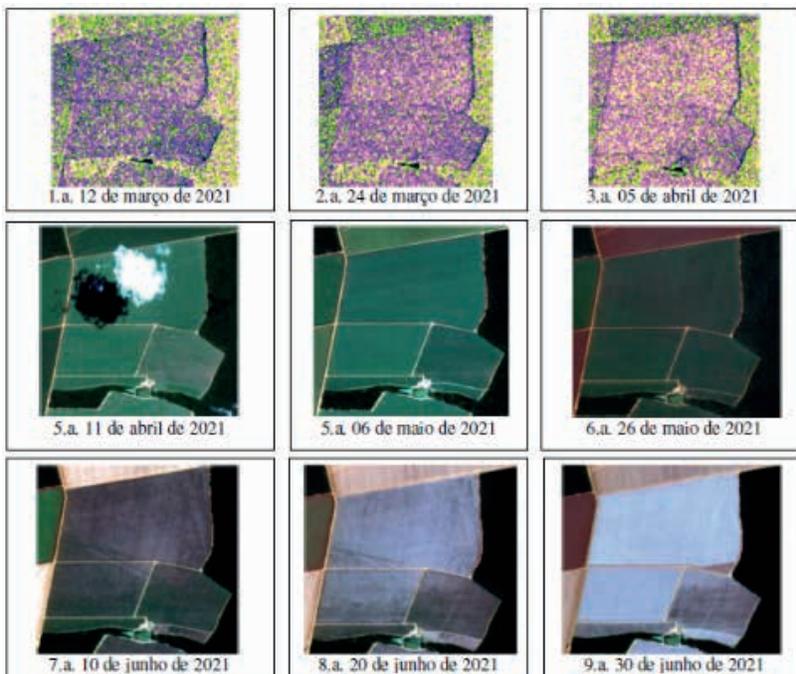
Figura 7. Área de algodão
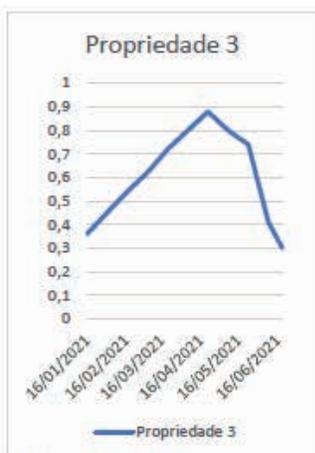
Tabela 4. Índice de EVI

Figura 8. Área de algodão

REFERÊNCIAS

[1] BARIANI, C.; DUTRA DE FELICE, R.; MARIO VICTORIA BARIANI, N. APLICAÇÃO DO SENSORIAMENTO REMOTO EM PROPRIEDADES RURAIS PARA FINS DE FISCALIZAÇÃO DE CRÉDITO RURAL. Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão, v. 8, n. 3, 14 fev. 2020.

[2] BERTOLIN, Natalia Oliveira.; FILGUEIRAS, Roberto.; VENANCIO, Luan Peroni.; MANTOVANI, Everardo Chartuni. Predição da produtividade de milho irrigado com auxílio de imagens de satélite. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada, Fortaleza, 11, n4, p. 1627 – 1638, 2017. DOI 10.7127/rbai.v11n400567. Disponível em: https://doi.org/10.7127/rbai.v11n400567

[3] BRASIL, MINISTÉRIO DA ECONOMIA/BANCO CENTRAL DO BRASIL. RESOLUÇÃO Nº 4.895, DE 26 DE FEVEREIRO DE 2021. Disponível em: < https://www.in.gov.br/en/web/dou/- /resolucao-cmn-n-4.895-de-26-de-fevereiro-de-2021-305690055>. Acesso em: 08 jul. 2021

[4] GERHARDT, Tatiana Engel; SILVEIRA, Denise Tolfo. Métodos de Pesquisa. Rio Grande do Sul: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

[5] GONSALVES, E. P. Conversas sobre iniciação à pesquisa científica. Campinas, SP: Alínea, 2001.

[6] GURGEL, H.C.; FERREIRA, N.J.; LUIZ, A. J. B. Análise da variabilidade espacial temporal do NDVI sobre o Brasil. In: Anais X SBSR, Foz do Iguaçu, INPE, p. 1617-1624, 2001. Disponível em: <http://mtcm12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/jeferson/2003/05.07.14.08/doc/publicacao.pdf>. Acesso em: 09 jul. 2021

[7] OLIVEIRA, L. V. A. Comportamento Espectral das culturas de milho, arroz e soja, usando imagens dos satélites sentinel-2, cbers-4 e landsat-8. 2020. 116p. Tese (Mestrado em Ciências Geoespaciais) – Escola de Engenharia, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2020.

[8] PONZONI, Flávio Jorge; SHIMABUKURO, Yosio Edemir. Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação. 2010. ed. São José dos Campos: Parêntese, 2010. 128 p

[9] POTTER, N. Can we grow more food in 50 years than in all of history? ABC News, New York, 5 out. 2009. Disponível em: Acesso em: 15 fev. 2020.

[10] RAMOS, M. C. A. Estimativa de Produtividade de cana-deaçúcar por meio de imagens do satélite Landsat-5/ TM em áreas de pivôs centrais na região de Jaíba - MG. 2013. 59 p. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Agrícola e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Montes Claros, 2013.

[11] RODRIGUES, Angélica dos Reis. A relevância do crédito rural como propulsor do desenvolvimento no agronegócio. Rio Verde: Universidade do Rio Verde, 2013.

[12] ROSA, V. G. C. da; MOREIRA, M. A.; RUDOFF, B. F. T.; ADAMI, M. Estimativa da produtividade de café com base em um modelo agrometeorológico-espectral. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 24, n. 12, p.1478-1488, dez. 2010.

SOBRE O ORGANIZADOR

LUIS RICARDO FERNANDES DA COSTA - Professor do Departamento de Geociências e do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Estadual de Montes Claros - UNIMONTES. Atualmente é Coordenador Didático do Curso de Licenciatura em Geografia (gestão 2021/2022). Doutor em Geografia (2017) pelo Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Ceará, com período sanduíche na Universidade de Cabo Verde - Uni-CV. É Licenciado (2012) e Mestre (2014) em Geografia pela Universidade Federal do Ceará (UFC). Foi bolsista de Iniciação Científica com o projeto Megageomorfologia e Geomorfologia Costeira do Nordeste Setentrional Brasileiro (Ceará e áreas adjacentes do Rio Grande Norte e Paraíba), com ênfase nos estudos sobre geomorfologia fluvial no sertão de Crateús e áreas adjacentes. Foi bolsista do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, na modalidade Apoio Técnico (AT). É pesquisador do Laboratório de Geomorfologia da UNIMONTES, atuando principalmente na área da geografia física com ênfase em geomorfologia, mapeamento geomorfológico e análise ambiental em áreas degradadas/desertificadas.

ÍNDICE REMISSIVO

B

C

D

E

F

G

L

M

www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br
@atenaeditora
www.facebook.com/atenaeditora.com.br

Geociências:

Entraves, lacunas profissionais e pesquisa

2

Ano 2023

www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br
@atenaeditora
www.facebook.com/atenaeditora.com.br
Geociências:
Entraves, lacunas profissionais e pesquisa
2
Atena
Editora
Ano 2023